Kalima Mendes Pitombeira
Antonio Aderson dos Reis Filho

Geração e análise de produtos cartográficos por fotogrametria com o uso de structure from motion – multi view stereo

1° Edição

São José dos Pinhais
BRAZILIAN JOURNALS PUBLICAÇÕES DE PERIÓDICOS E EDITORA
2020

Kalima Mendes Pitombeira
Antonio Aderson dos Reis Filho

Geração e análise de produtos cartográficos por fotogrametria com o uso de structure from motion – multi view stereo

1ª Edição

Brazilian Journals Editora
2020

2020 by Brazilian Journals Editora
Copyright © Brazilian Journals Editora
Copyright do Texto © 2020 Os Autores
Copyright da Edição © 2020 Brazilian Journals Editora
Editora Executiva: Barbara Luzia Sartor Bonfim Catapan
Diagramação: Sabrina Binotti
Edição de Arte: Sabrina Binotti
Revisão: Os Autores

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Autores:
Kalima Mendes Pitombeira
Bacharel em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura - UFPI

Antonio Aderson dos Reis Filho
Professor Doutor do Curso de Engenharia Cartográfica e de Agrimensura - Centro de Tecnologia/ UFPI

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

P685g Pitombeira, Kalima Mendes

Geração e análise de produtos cartográficos por fotogrametria com o uso de structure from motion – multi view stereo / Kalima Mendes Pitombeira. São José dos Pinhais: Editora Brazilian Journals, 2020. 92 p.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui: Bibliografia
ISBN: 978-65-86230-13-0

1. Mais acessibilidade e facilidade no processo. 2. Novo método de Fotogrametria. I. Pitombeira, Kalima Mendes. II. Filho, Antonio Aderson dos Reis. III. Título.

Brazilian Journals Editora
São José dos Pinhais – Paraná – Brasil
www.brazilianjournals.com.br
editora@brazilianjournals.com.br

Ano 2020

APRESENTAÇÃO

Devido à importância da execução de levantamentos tridimensionais de superfícies e sua representação cartograficamente, existem diversas metodologias para a realização desse tipo de trabalho. Por isso o valor dos instrumentos ou sensores a serem utilizados, a qualidade e quantidade requeridas dos dados, bem como sua precisão, o rigor necessário durante as atividades de campo e o tempo despendido para realizá-las são os principais fatores que influenciam na escolha do tipo de técnica de ser aplicada conforme a finalidade do levantamento. Nesse sentido, o método de fotogrametria que faz uso do processamento das imagens por algoritmos de *Structure from Motion* e *Multi-View Stereo* (SfM-MVS) surgiu como uma alternativa consideravelmente mais acessível financeiramente que a fotogrametria tradicional e que os equipamentos de varredura, uma vez que os sensores utilizados podem ser de câmeras digitais não métricas, permitindo também a versatilidade do uso de plataformas como pipas, balões, veículos aéreos não tripulados (VANTs), bastões telescópicos e até mesmo sem acoplar a câmera em nenhum instrumento. Além disso, por não requerer pontos de controle para solucionar a geometria da superfície, apenas para referenciá-la, o operacional relacionado ao apoio de campo torna-se mais barato e de fácil execução. Portanto, por se tratar de uma metodologia inovadora e com bastante potencial para melhorar cada vez mais a precisão e acurácia dos dados coletados, o uso de SfM-MVS vem sendo amplamente estudado pela comunidade científica internacional.

No entanto, é uma temática que ganhou representatividade para aplicações direcionadas as geociências somente na última década. Assim, o referente estudo foi realizado como uma forma de analisar a viabilidade do emprego da técnica SfM-MVS para geração de modelos digitais do terreno e produtos cartográficos planialtimétricos com qualidade posicional a partir de imagens obtidas com fotogrametria terrestre. Para isso, tais modelos foram classificados conforme os parâmetros de exatidão brasileiros estabelecidos pela Comissão Nacional de Cartografia (2011), adaptados para escalas grandes considerando fotos capturadas à curta distância. Para isso, realizou-se uma ampla pesquisa bibliográfica que pudesse nortear a escolha da metodologia a ser aplicada, considerando que a coleta de dados em campo pode ser executada de diversas maneiras, bem como esses algoritmos permitem diferentes implementações e etapas a serem realizados em *softwares* ou plataformas. Devido à variabilidade de combinações existentes, tais possibilidades foram discutidas brevemente no escopo deste trabalho, recomendando as referências citadas aos leitores que desejam se aprofundar nessa temática.

A divisão desta publicação segue, então, com 7 capítulos: o primeiro com uma visão geral sobre o tema associado ao avanço tecnológico; os três seguintes retratam o embasamento teórico que fundamentam este estudo (relativo à fotogrametria, SfM-MVS e controle de qualidade cartográfico); o quinto com a explicação minuciosa dos materiais utilizados e métodos aplicados; o sexto com os resultados numéricos obtidos e discussões a respeito do que representam, além da exposição de mapas gerados com os dados coletados; o último com o apontamento das conclusões gerais do trabalho, bem como as contribuições da pesquisa e suas limitações.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Visão estereoscópica 5
Figura 2 – Geometria da foto vertical 6
Figura 3 – Aquisição de imagens 19
Figura 4 – Câmera acoplada à pipa 22
Figura 5 – Balão equipado com câmera.....23
Figura 6 – Câmera acoplada a VANT 24
Figura 7 – Bastão telescópico com câmera 25
Figura 8 – Fluxograma padrão do SfM-MVS.....28
Figura 9 – Conjunto de feições identificadas pelo SIFT 30
Figura 10 – Precisão da distribuição com erro sistemático 42
Figura 11 – Exatidão da distribuição 43
Figura 12 – Mapa de localização.....46
Figura 13 – Câmera Nikon Modelo D7000 47
Figura 14 – Tripé telescópico 47
Figura 15 – Estação Total 48
Figura 16 – Ponto de controle utilizado 49
Figura 17 – Disposição dos pontos de controle no terreno 49
Figura 18 – Estação total na linha de base visando os pontos de controle.....50
Figura 19 – Aquisição das fotografias 51
Figura 20 – Fotografia do terreno adquirida em campo 52
Figura 21 – Posições estimadas da câmera no momento das exposições 53
Figura 22 – MDT gerado pela interpolação da nuvem esparsa de pontos 54
Figura 23 – Fotografias que apresentam o ponto de controle P1.....54
Figura 24 – Identificação dos pontos *software* 55
Figura 25 – Refinamento dos parâmetros internos da câmera 55
Figura 26 – Nuvem de pontos densificada 56
Figura 27 – Área de interesse delimitada.....56
Figura 28 – Modelo digital do terreno.....61
Figura 29 – Textura aplicada no MDT 62
Figura 30 – Mapa de ortomosaico em escala 1/250.....72
Figura 31 – Mapa de MDE no plano YZ em escala 1/250.....73
Figura 32 – Mapa de MDE no plano XY em escala 1/250.....74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais *softwares* que utilizam algoritmos de SfM-MVS 26
Tabela 2 – Comparação entre normas de qualidade de produtos cartográficos 44
Tabela 3 – Classificação da acurácia de cartas impressas 44
Tabela 4 – Classificação da acurácia de produtos digitais 45
Tabela 5 – Coordenadas dos pontos de controle 63
Tabela 6 – Raiz do erro quadrático médio dos pontos de controle 63
Tabela 7 – Raiz do erro quadrático médio dos pontos de verificação 64
Tabela 8 – Coordenadas estimadas e observadas 65
Tabela 9 – Discrepâncias entre as coordenadas estimadas e observadas 65
Tabela 10 – Avaliação de tendência 66
Tabela 11 – Erro padrão planimétrico 67
Tabela 12 – Variância do erro padrão planimétrico 67
Tabela 13 – Cálculo estatístico para a coordenada X 67
Tabela 14 – Cálculo estatístico para a coordenada Y 68
Tabela 15 – Avaliação de exatidão para a coordenada X 68
Tabela 16 – Avaliação de exatidão para a coordenada Y 68
Tabela 17 – Erro padrão altimétrico 69
Tabela 18 – Variância do erro padrão altimétrico 69
Tabela 19 – Cálculo estatístico para a coordenada Z 70
Tabela 20 – Avaliação de exatidão para a coordenada Z 70

LISTA DE SIGLAS

AMSDAS	*Australian Map and Spatial Horizontal Data Accuracy Standard*
ASPRS	*American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*
BRIEF	*Binary Robust Independent Elementary Features*
CMOS	*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*
CMVS	*Clustering View forMulti-view Stereo*
CONCAR	Comissão Nacional de Cartografia
DLSR	*Digital Single Lens Reflex*
EP	Erro Padrão
ET-ADGV	Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais
GNSS	Sistema Global de Navegação por Satélite
GPS	Sistema de Posicionamento Global
KAP	Fotografia Aérea com Pipa
LDAHash	*Linear Discriminant Analysis*
LiDAR	Sistema de Escaneamento a Laser
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
MMQ	Menor Mediana dos Quadrados dos Resíduos
MQO	Mínimos Quadrados Ordinários
MVS	*Multi-View Stereo*
NMAS	*United States National Map Accuracy Standards*
PEC	Padrão de Exatidão Cartográfica
PEC-PCD	Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais
PMVS2	*Patch-based Multi-view Stereo*
RANSAC	*Random Sample Consensus*
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RSME	Raiz do Erro Médio Quadrático
SfM	*Structure from Motion*
SIFT	*Scale Invariant Feature Transform*
SURF	*Speeded-Up Robust Features*
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

CAPÍTULO 01 ..... **1**
Introdução **1**
CAPÍTULO 02 ..... **3**
Fotogrametria **3**
2.1 Conceitos Fundamentais 4
2.1.1 Estereoscopia 4
2.1.2 Geometria Da Foto 5
2.2 Apoio Terrestre 7
2.2.1 Controle Horizontal 8
2.2.2 Controle Vertical 9
2.2.3 Controle Terrestre Com Gnss 9
2.3 Fototriangulação 10
2.4 Restituição 11
2.3 Fotogrametria Terrestre 12
CAPÍTULO 03 ..... **15**
Structure From Motion – Multi View Stereo **15**
3.1 Relação Com A Fotogrametria Tradicional 17
3.2 Procedimentos De Execução 18
3.2.1 Aquisição Da Imagem 18
3.2.2 Pontos De Controle 20
3.2.3 Plataformas Para Implantação Da Câmera 21
3.2.3 Softwares 25
3.3 Etapas De Processamento 27
3.3.1 Reconhecimento De Feições 28
3.3.2 Correspondência De Feições 30
3.3.3 Detecção De Relações Geometricamente Consistentes 31
3.3.4 Solução Da Estrutura Tridimensional 33
3.3.5 Escala E Georreferenciamento 36
3.3.6 Refinamento Dos Parâmetros 37
3.3.7 Densificação Da Nuvem De Pontos 37
CAPÍTULO 04 ..... **40**
Controle De Qualidade Na Cartografia **40**
4.1 Classificação Dos Erros 40
4.2 Precisão E Acurácia 42
4.3 Padrão De Exatidão Cartográfica 43
CAPÍTULO 05 ..... **46**

Metodologia **46**
5.1 Área De Estudo 46
5.2 Materiais 46
5.3 Procedimentos De Campo 48
5.4 Processamento 52
5.5 Avaliação Da Precisão Posicional 57
5.6 Avaliação De Tendência 58
5.7 Avaliação Da Exatidão Cartográfica 59
CAPÍTULO 06 ..... **61**
Resultados **61**
6.1 Avaliação Da Precisão Posicional 63
6.2 Avaliação De Tendência 65
6.3 Avaliação Da Exatidão Cartográfica 66
CAPÍTULO 07 ..... **74**
Conclusão **74**
REFERÊNCIAS **76**
APÊNDICES **84**
Apêndice A – Relatório De Processamento No Agisoft **84**
ANEXOS **91**
Anexo A – Tabela Da Distribuição T De Student **91**
Anexo B – Tabela Da Distribuição Qui-Quadrado **92**

DOI 10.35587/brj.ed.0000324

CAPÍTULO 01

INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento da tecnologia, os avanços em precisão, automatização e rapidez na coleta de dados espaciais abrangeram diversos ramos das geociências, sendo perceptíveis as mudanças no aperfeiçoamento de instrumentos como os medidores eletrônicos de distância, com o surgimento de estações totais robóticas e equipamentos de varredura como o *laser scanner* que possibilitam o armazenamento de centenas de milhares de pontos por segundo, os receptores de Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS), que integraram a coleta de dados emitidos por diversas constelações (GPS, Glonass, Galileo, Beidou e Compass).

No quesito de imageamento das superfícies, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) passaram a ter mais autonomia de voo permitindo fotografar áreas maiores com resultados métricos mais acurados e os satélites de sensoriamento remoto obtiveram significativa melhora em suas resoluções espaciais, temporais, radiométricas e espectral, entre outros. Além disso, o processamento de informações geográficas também se tornou mais dinâmico e acessível aos profissionais que trabalham com esses dados, tendo sido criados algoritmos com análises mais detalhadas e que exigem menos do *hardware* dos computadores.

Entretanto, para a formação de modelos digitais de elevação do terreno (MDT), utilizando técnicas de topografia clássica ou levantamentos geodésicos a coleta de dados tridimensionais é realizada ponto a ponto, limitando assim o nível de detalhamento das feições retratadas. Assim, é necessário que sejam escolhidos previamente, de acordo com os relevos mais notáveis, quais feições terão seus dados espaciais armazenados. Já em relação aos produtos cartográficos resultantes do processamento de imagens por fotogrametria, o volume de informações geoespaciais disponíveis é considerável, uma vez que a restituição realizada permitirá o referenciamento simultâneo de vários pontos com precisão, contudo com a desvantagem de que o processo exige grande conhecimento específico do profissional e o alto rigor na execução do levantamento (STUMPF et al., 2014).

Quanto aos instrumentos de varredura como o *laser scanner*, esse instrumento é capaz de gerar uma nuvem densa de pontos, permitindo que o MDT gerado possua grande nível de detalhamento, além de realizar a coleta de dados de forma

automatizada. Contudo, a utilização dessa técnica ainda é muito restrita devido ao preço do equipamento que é bastante oneroso. No tocante ao processamento de imagens de sensores altimétricos presentes nos satélites (SRTM, ASTER, etc), apesar da facilidade de obtenção das informações, o fato das resoluções espaciais dessas bandas espectrais serem normalmente na grandeza de metros costuma limitar seu uso a áreas muito grandes e modelos de elevação com precisões significativamente inferiores aos levantamentos topográficos e geodésicos (SMITH; CARRIVICK; QUINCEY, 2016).

Por meio de avanços de visão computacional e da fotogrametria digital, surgiu a técnica *Structure from Motion* (SfM), cujo princípio foi inicialmente proposto por Ullman (1979) com o intuito de realizar a interpretação tridimensional de superfícies a partir de transformações bidimensionais de suas projeções em perspectiva, isto é, de fotografias desses objetos, sem que fossem necessários ter conhecimento inicial de nenhuma informação tridimensional. Desse modo, sem ter a determinação inicial nem dos parâmetros internos da câmera nem de pontos de controle, a reconstrução geométrica a partir das imagens é executada por meio de reconhecimento e correspondência de feições seguida da solução simultânea da estrutura e do movimento do objeto, gerando uma nuvem de pontos esparsa em um sistema de coordenadas arbitrário. Torna-se, então, opcional submetê-la à escala e referenciá-la a um Datum existente.

Posteriormente, com o intuito de gerar modelos digitais do terreno mais consistentes, representativos e com maior qualidade, foram desenvolvidas metodologias para densificar essa nuvem de pontos, dando origem aos algoritmos de *Multi-View Stereo* (MVS). Esse método consiste em utilizar a posição dos pontos de exposição e os parâmetros de orientação interna e externa da câmera solucionados no SfM como informação *a priori* para que seja resolvida a configuração espacial dos objetos existentes nas imagens utilizadas, propiciando o acréscimo da quantidade de pontos em, no mínimo, dois graus de magnitude, bem como permitindo a redução dos ruídos e erros na correspondência de feições (HARWIN; LUCIEER, 2012; QU; HUANG; ZHANG, 2018).

CAPÍTULO 02

FOTOGRAMETRIA

O termo fotogrametria é etimologicamente derivado de três palavras em grego: *photos* que significa luz, *gramma,* que se refere à descrição gráfica e *metron,* que significa medir. Desse modo, analisando a origem da palavra, fotogrametria consiste em realizar medições graficamente através da análise da luz (MARCHETTI; GARCIA, 1986). Por esse motivo, a Sociedade Americana de Fotogrametria (1998) apud Tomaselli et. al (1999, p.1) definiu-a como sendo:

> A arte, ciência e tecnologia de obtenção de informação confiável sobre objetos físicos e o meio ambiente através de processos de registro, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética irradiada e outras fontes.

Como é possível deduzir a partir de sua nomenclatura, essa ciência inicialmente baseava-se apenas na análise de fotografias, mas com o advento da tecnologia, o uso de sensores como imageamento digital, laser scanners, fenômenos eletromagnéticos e energia acústica irradiada ganhou destaque por abranger a aplicação em situações adversas e facilitar a aquisição de dados espaciais para diversas finalidades. Além disso, seu conceito também está ligado a duas subáreas distintas e de extrema importância para o processo de restituição das informações presentes no local levantado, as quais consistem na etapa métrica e interpretativa da fotogrametria, se referindo respectivamente à análise quantitativa e qualitativa das imagens obtidas (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

A investigação quantitativa na fotogrametria tem o objetivo de permitir a localização relativa de pontos e a obtenção de distâncias, áreas, volumes, elevações, ângulos e forma dos objetos por meio da execução de medições precisas nas fotografias, sendo geralmente destinada para a confecção de mapas topográficos e planimétricos, bem como de ortofotos. Já na etapa conhecida como fotointerpretação são realizadas análises para detectar objetos e atribuir-lhes significados, através de uma avaliação cuidadosa e sistemática, determinando os tipos de vegetação presente, classificando os solos, identificando formações geológicas, reconhecendo diferentes cultivos, constatando poluição de corpos hídricos, entre outras formas de análise que estão ligadas às características qualitativas da região estudada. Assim, é importante enfatizar que, no processo de interpretação, mesmo não sendo essencial,

geralmente é necessário que sejam realizadas algumas medições, da mesma forma que uma certa quantidade de interpretação deve ser aplicada durante a etapa métrica e por isso ambas estão profundamente interligadas ao conceito de fotogrametria (MOFFIT; MIKHAIL, 1980; WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

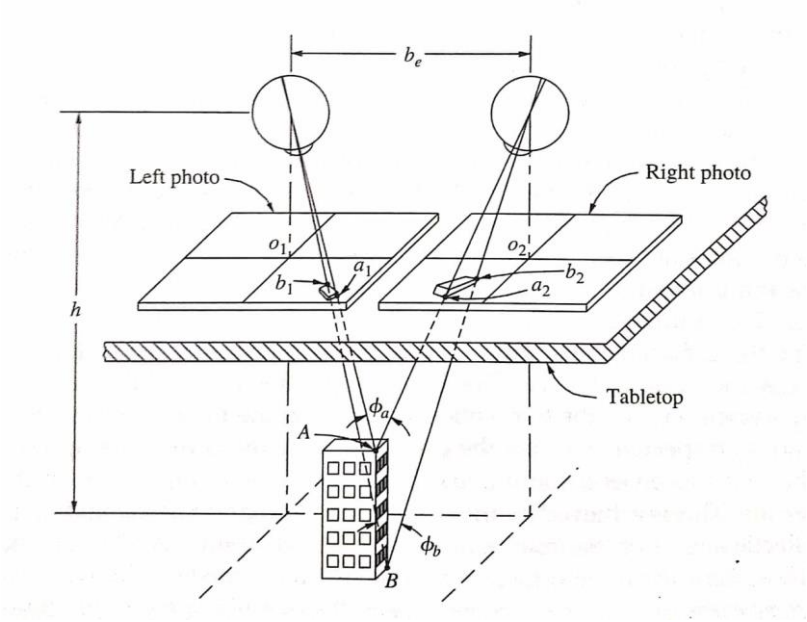
Como forma de facilitar o entendimento dos princípios intrínsecos à fotogrametria e a metodologia envolvida nos processos de restituição de dados geográficos de objetos e superfícies a partir de imagens, é importante que sejam discutidos conceitos que fundamentam a aplicação dessa ciência e dão suporte para realizar o planejamento e a execução tanto do trabalho de campo quanto de escritório, pertinentes em levantamentos fotogramétricos. Além disso, também se faz necessário esclarecer termos que envolvem outras áreas, fenômenos ou mesmo produtos gerados a partir do uso da fotogrametria como ferramenta de mapeamento com precisão métrica.

2.1.1 ESTEREOSCOPIA

Quando são visualizados objetos que se encontram a diferentes distâncias do ponto em relação ao observador, simultaneamente pelos dois olhos, ocorre o fenômeno natural de estereoscopia, o qual confere uma percepção da terceira dimensão espacial, isto é, de profundidade relativa das feições. Isso se dá pelo fato de que os olhos humanos são separados por uma distância de aproximadamente 65mm, permitindo que um mesmo objeto seja observado de pontos de perspectivas diferentes no mesmo eixo, existindo uma porção da superfície identificada por ambos que forma uma imagem interpretada pelo cérebro como sendo tridimensional (PAREDES, 1986).

Desse modo, a fotogrametria faz uso da estereoscopia com o intuito de permitir a reprodução desse mesmo fenômeno simulando o processo realizado pelo olho com o uso de fotografias. A visão estereoscópica indireta é, então, reproduzida por meio da visualização conjunta de um par de imagens que são capturadas em posições homólogas aos olhos e que são dispostas de forma que a fotografia da direita seja observada apenas pelo olho direito e a da esquerda pelo olho esquerdo (Figura 01). Por isso, essas projeções registradas consecutivamente e que apresentam uma região imageada em comum (superposta) são então denominadas de par estereoscópico (ANDRADE, 1998; PAREDES, 1986).

Figura 01 – Visão estereoscópica.



Fonte: Wolf, Dewitt e Wilkinson (2014).

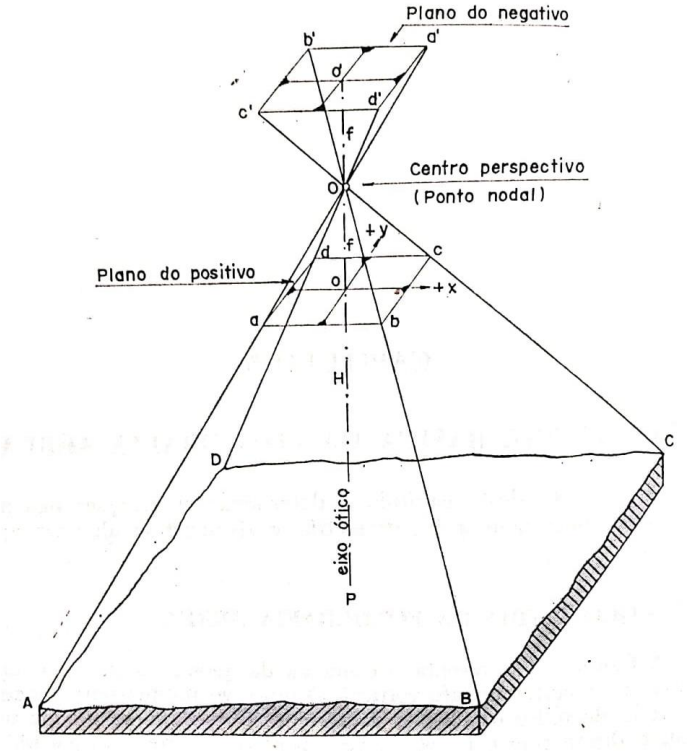
Assim, existem diferentes métodos de projetar a visão estereoscópica indireta, bem como equipamentos que auxiliam nesse processo, destacando-se: estereoscópio de lentes, os quais são formados por duas lentes convergentes que permitem um paralelismo entre os eixos óticos dos olhos e direcionam a retina para suas respectivas imagens; estereoscópio de espelho, que consiste na utilização de espelhos para propiciar um maior afastamento das fotografias por conta de suas dimensões; anaglifo, o qual está relacionado à impressão ou projeção das imagens com duas colorações distintas e que são filtradas por um óculos que permite a visualização em preto e branco da perspectiva; a polarização da luz nas cenas em planos perpendiculares em conjunto com utilização de óculos com filtros polaroides que direcionam as fotografias para os olhos correspondentes; e o cintilamento que consiste na exibição das imagens de forma alternada para os dois olhos, entretanto em um intervalo de tempo inferior à 1/24 segundos, que é o necessário para a imagem esvanecer na retina, causando o efeito de estar visualizando as duas fotos simultaneamente (ANDRADE, 1998).

2.1.2 GEOMETRIA DA FOTO

Um mapa consiste em uma porção da superfície terrestre projetada ortogonalmente em um plano, sendo então cada ponto do terreno representado por raios verticais e perpendiculares ao plano de referência. Já no caso de projeções em perspectiva, ou projeções centrais, como nas fotografias, todos as feições são

apresentadas através de um único ponto denominado de centro de perspectiva, sendo este o centro da lente da câmera. Desse modo, a região existente entre o centro de perspectiva e a foto capturada é denominado de espaço da imagem, enquanto a porção ocupada pelo terreno a ser fotografado, inclusive o sistema de coordenadas de referência, é chamado de espaço do objeto. A Figura 02 mostra essas relações geométricas na fotografia vertical (MOFFITT; MIKHAIL, 1980; TAVARES; FAGUNDES, 1991).

Figura 02 – Geometria da foto vertical.



Fonte: Paredes (1986).

O plano da imagem contém uma projeção bidimensional de um espaço do objeto tridimensional, sendo possível representar cada ponto na fotografia através de um sistema de coordenadas cartesianas com origem no centro da foto, definindo os eixos planimétricos através das marcas fiduciais (sistema fiducial). No entanto, para descrever a elevação do terreno, o terceiro eixo é estabelecido como saindo da imagem, no caso de imagens aéreas é definido como o eixo Z e para fotografias terrestres como o eixo X. Para o espaço objeto é normalmente utilizado um sistema dextrógeno e tridimensional, também de coordenadas cartesianas. Mesmo que seja possível definir outros tipos de coordenadas para determinar a posição espacial dos pontos de controle, o desenvolvimento matemático que relaciona o espaço do objeto

e da imagem é mais simplificado se ambos forem transformados anteriormente em sistemas cartesianos (MOFFITT; MIKHAIL, 1980).

Visando apresentar definições importantes referentes à geometria da foto, podem ser descritos os conceitos de (MARCHETTI; GARCIA, 1986; PAREDES, 1986): Distância focal: é a distância perpendicular entre o ponto nodal (centro de perspectiva) e o plano de projeção da fotografia; Estação ou ponto de exposição: é a posição no espaço do ponto nodal na tomada da fotografia; Altura de voo: é a distância vertical entre o ponto de exposição e a superfície terrestre fotografada; Ponto-nadir: é o ponto no qual a linha vertical intercepta o plano da fotografia ou o terreno, através do centro de perspectiva da câmera.

Quanto à escala das imagens, diferente de mapas na qual existe uma proporção direta entre todas as linhas representadas no mapa e suas correspondências na superfície terrestre, não é possível estabelecer uma única escala para a fotografia vertical. Isso acontece porque, sendo a escala da foto a relação entre a distância focal e a distância do ponto de exposição ao objeto, essa altura de voo varia por conta do relevo do terreno, apresentando diferentes relações de proporcionalidade ao longo de uma mesma imagem. Por esse motivo, para representar a escala nas fotos verticais, é determinada uma distância média, levando em consideração um plano médio sobre a área fotografada, resultando em uma escala aproximada das linhas projetadas (MARCHETTI; GARCIA, 1986; TAVARES; FAGUNDES, 1991).

2.2 APOIO TERRESTRE

De acordo com Wolf, Dewitt e Wilkinson (2014), normalmente o controle fotogramétrico é composto de pontos cujas posições são conhecidas em um sistema de coordenadas no espaço e cujas imagens podem ser claramente visualizadas e identificadas nas fotografias. Assim, o apoio terrestre proporciona a relação entre as fotografias e o terreno, sendo necessário em praticamente todas as etapas do trabalho fotogramétrico. Esse controle é geralmente dividido em planimétrico, que a posição do ponto é relacionada a um *datum* horizontal, e altimétrico, na qual a posição refere-se a um *datum* vertical. Tal separação ocorre devido à diferença entre os sistemas de referência e entre os métodos utilizados para a definição dos pontos de controle horizontal e vertical. Entretanto, é comum deparar-se com pontos cujas coordenadas tridimensionais são conhecidas, funcionando como controles em ambos os aspectos.

O processo de levantamento para controle fotogramétrico é tradicionalmente baseado em dois passos, embora como advento do uso do GNSS essas etapas não estejam bem distinguidas uma da outra. A primeira fase consiste na determinação de uma rede de controle básico na área em que será realizado o imageamento, formada por marcos de controle horizontal e vertical, que serão utilizados como estruturas de referência para o estabelecimento dos pontos de controle na fotografia. Já o segundo passo envolve o estabelecimento da localização do controle na fotografia a partir desse processo, feito com base nas imagens dos pontos nas fotos. Assim, a definição de um bom controle terrestre é um fator imprescindível em praticamente todo projeto fotogramétrico, sendo importante ressaltar que a acurácia dos produtos finais não pode ser superior à dos pontos de controle utilizados. Portanto, devido à importância dessa etapa sua execução deve ser bem planejada, principalmente porque seu custo é normalmente considerável, podendo chegar de 10 a 50 % do custo total do projeto em alguns casos (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014; LEHMANN, 1975).

2.2.1 CONTROLE HORIZONTAL

Existem vários métodos para a execução de levantamentos de campo, dentre os quais podemos destacar os principais como sendo poligonação, triangulação e trilateração. No referente aos instrumentos, as estações totais e os teodolitos são amplamente utilizados para medição de ângulos e distâncias associadas à essas metodologias (MOFFITT; MIKHAIL, 1980).

O processo de poligonação é o mais empregado em práticas de campo e consiste na medição de ângulos e distâncias horizontais entre pontos consecutivos de uma rede fechada (no caso de poligonais fechadas), incluindo as estações de controle já existentes na região. Apoiadas nas coordenadas dessas estações e nos ângulos e distâncias medidas, as coordenadas dos demais pontos são calculadas trigonometricamente no sistema de coordenadas retangular dos referenciais de controle. Geralmente é realizado um ajustamento desses parâmetros, devido à abundância de observações providas em campo, com o intuito de reduzir os erros nessas coordenadas (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

Já para a triangulação e a trilateração a rede deve ser composta por figuras triangulares, sendo no primeiro caso realizadas medições dos ângulos horizontais entre as estações e no segundo das distâncias entre os pontos. Usualmente esses métodos são utilizados simultaneamente, de forma que a quantidade de observações se torna bem maior que as variáveis a se determinar (coordenadas das estações).

Isso significa que através do ajustamento por mínimos quadrados a acurácia dessas coordenadas torna-se bem melhor (MOFFITT; MIKHAIL, 1980).

2.2.2 CONTROLE VERTICAL

No referente aos pontos de controle verticais, estes são comumente estabelecidos a partir da determinação da diferença altimétrica com o uso de níveis e hastes graduadas. O instrumento denominado de nível nada mais é que um telescópio de observação com retículo para leitura na mira graduada que se mantem inclinado a 90 graus em relação a seu eixo vertical, garantindo que as medições entre dois pontos sejam realizadas no mesmo plano (horizontal). Assim, basta subtrair a medição encontrada no ponto que se deseja determinar a cota por aquele de coordenada vertical conhecia (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

Outro método para determinação de diferença de níveis é através do nivelamento trigonométrico, cuja utilização é indicada em situações que a acurácia exigida é relativamente moderada e quando o terreno for muito acidentado. Para esse processo são normalmente usadas estações totais, a partir das quais são medidos o ângulo zenital e a distância inclinada entre o ponto de controle e o refletor, posicionado sobre o ponto a que se destina. Desse modo, sua cota é calculada com o uso de relações trigonométricas, justificando a nomenclatura desse tipo de nivelamento. É importante ressaltar que a compensação dos erros devido à curvatura da Terra e à refração atmosférica devem ser corrigidos em qualquer que seja a metodologia adotada, podendo ser por modelos matemáticos ou, no caso do nivelamento com nível, posicionando o aparelho à igual distância entre os dois pontos, procedimento conhecido como método das visadas iguais (MOFFITT; MIKHAIL, 1980).

2.2.3 CONTROLE TERRESTRE COM GNSS

O desenvolvimento do chamado GNSS (*Global Navigation Satellite System*), tem revolucionado todas as atividades que necessitam de posicionamento. No intuído de usufruir destas novas tecnologias e, principalmente, do potencial dos sistemas de posicionamento globais existentes, com o passar dos anos, os métodos para tal aplicação vêm se aprimorando. Nesse contexto, Monico (2008) classifica esse tipo de posicionamento de acordo com duas características principais: em razão do referencial ao quão estão sendo relacionadas as coordenadas, podendo ser absoluto, relativo ou diferencial, e em relação ao estado inercial do objeto, sendo subdividido em estático, cinemático e estático rápido.

Dentre eles, o mais usado na fotogrametria são os posicionamentos estáticos relativo e diferencial, devido à maior precisão posicional obtida por esses métodos (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014). O posicionamento relativo consiste na utilização de no mínimo dois receptores medindo simultaneamente os sinais transmitidos pelos satélites, cuja observável é a diferença de fase da onda portadora. Já no posicionamento diferencial (DGPS), temos a exigência do uso de uma estação geodésica já existente, em âmbito nacional as que fazem parte da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS (RBMC), cujas coordenadas conhecidas devem estar referenciadas a um sistema geodésico (MONICO, 2008).

2.3 FOTOTRIANGULAÇÃO

O processo de determinação das coordenadas cartesianas terrestres X, Y e Z de pontos suplementares de controle horizontal e vertical por meio das relações geométricas entre as fotografias é usualmente denominado de aerotriangulação. Entretanto, o termo fototriangulação é mais abrangente, uma vez que esse método também pode ser aplicado para fotos terrestre. Dentre os variados empregos dessa técnica, podemos citar como um dos principais a densificação de pontos de controle terrestres a partir de faixas e blocos de fotografias para uso em posteriores projetos fotogramétricos. Como o número mínimo de pontos de controle necessários em cada modelo estereoscópio é de dois planimétricos e três altimétricos, sendo em casos de mapeamento de grandes áreas necessários várias estações de controle, o custo para definição destes pode ser oneroso se for feita unicamente por meio de medições topográficas. Portanto, muitos desses pontos de controle são determinados através da fototriangulação, baseados em uma pequena rede de levantamento de campo (ANDRADE, 1998; PAREDES, 1986).

Além do valor econômico ser consideravelmente menor, há outras vantagens no uso da fototriangulação em relação às medições topográficas, entre elas: a maior parte do trabalho é desenvolvida em escritório, portanto as condições temporais adversas não influenciam o andamento do projeto; a necessidade de realizar levantamentos de campo pode ser minimizada em locais perigosos; a acurácia do controle terrestre necessário é verificada durante esse processo, isso significa que a probabilidade de serem encontrados erros nas estações de controle após o processo de compilação ser iniciado é minimizado ou até mesmo eliminado. Desse modo, essas vantagens são tão significativas que algumas empresas executam a fototriangulação mesmo em regiões que possuam uma rede adequada de controle terrestre, além de

serem o motivo pelo qual alguns projetos de mapeamento exigem que esse processo seja utilizado para a determinação do controle nas fotografias (TAVARES; FAGUNDES, 1991; WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

A fototriangulação pode ser realizada por duas técnicas distintas, por meio da triangulação radial ou da estereotriangulação. A primeira metodologia pode ser usada para circunstâncias em que não é exigida uma precisão rigorosa no serviço executado ou quando a finalidade é confeccionar produtos cartográficos como mapas planimétricos com pouco nível de detalhamento (escala pequena) e mosaicos controlados. Assim, a triangulação radial parte do princípio que as imagens são perfeitamente verticais (com tolerância de até 3° de inclinação), tomando como base as características geométricas das fotos para determinar os deslocamentos oriundos do relevo, das distorções das lentes e da refração atmosférica nas linhas que convergem para o ponto central. **Portanto, os ângulos definidos no ponto principal da imagem não dependem da escala da fotografia nem do relevo, formando ângulos verdadeiros e constantes (PAREDES, 1986).**

Já o método de estereotriangulação pode ser realizado de três formas, podendo ser analógico, semi analítico e analítico. Para a primeira classe, inicialmente devem ser realizadas manualmente orientações interior, relativa e absoluta em cada estereomodelo em todas as faixas de voo através do uso de estereoscópios, gerando longas faixas de pares fotogramétricos dos quais podem ser observadas diretamente as coordenadas dos pontos desejados. Já o método semi analítico consiste no desenvolvimento manual da orientação interior e relativa a partir do uso de estereoscópios, sendo a orientação absoluta executada numericamente e na posterior medição de coordenadas dos modelos. Por fim, a técnica analítica envolve primeiramente a medição de coordenadas na foto, seguida pelo ajuste numérico das orientações interior, relativa e absoluta através dos pontos de controle terrestres utilizados no processo (TAVARES; FAGUNDES, 1991).

2.4 RESTITUIÇÃO

A restituição do espaço é o termo utilizado para se referir à determinação da posição e orientação correta das várias imagens fotografadas baseada em medições realizadas nas imagens dos pontos de controle visíveis em cada foto. Para permitir que esse processo seja executado, é necessário a existência de, pelo menos, três pontos de controle por fotografia, dos quais sejam conhecidas as coordenadas horizontais e elevações e que não estejam dispostos de maneira próxima a uma linha

reta. Dessa maneira, a técnica mais comum para a realização da restituição é baseada no princípio da colinearidade dos raios fotogramétricos, cujas equações expressam a relação entre o centro de perspectiva, o ponto na imagem e o ponto no espaço do objeto disposto sobre uma linha reta (MARCHETTI; GARCIA, 1986; MOFFITT; MIKHAIL, 1980).

Com a finalidade de permitir a restituição fotogramétrica de um modelo estereoscópico e, a partir dele, executar medições, é necessário que sejam feitas as orientações internas e externas das fotos. A recuperação da posição da imagem em relação à câmera possibilita que sejam reconstruídos os feixes perspectivos que geraram as fotografias. Em outras palavras, as características geométricas da orientação interior representam a posição do centro de perspectiva em relação ao sistema de coordenadas da fotografia e as distorções da lente do sensor. Assim, se uma foto é posicionada em relação à lente da câmera de modo que as três coordenadas do centro de perspectiva são corretamente recuperadas, os feixes que partem da lente serão idênticos aos que atingiram a câmera no momento da captura das imagens (ANDRADE, 1998; LEHMANN, 1975; TAVARES; FAGUNDES, 1991).

Já a orientação exterior de uma foto se refere à determinação dos componentes que estabelecem a posição do centro e do eixo ótico em relação ao sistema referencial terrestre, normalmente no qual se deseja realizar o trabalho fotogramétrico. Para isso, existem seis parâmetros que devem ser determinados: as três translações que definem a posição do centro de projeção exterior da imagem (coordenadas do centro de exposição), ou seja, que sobrepõem as origens do sistema imagem e do sistema do objeto e as três rotações que estabelecem a orientação do feixe de raios da foto, isto é, que quando aplicadas permite a coincidência do sistema terrestre com o da fotografia (os ângulos de Euler). Desse modo, para orientar externamente um par estereoscópio, é necessário que sejam realizadas as reconstituições dos seis parâmetros de ambas as fotografias simultaneamente, totalizando doze elementos de orientação (ANDRADE, 1998; PAREDES, 1986).

2.3 FOTOGRAMETRIA TERRESTRE

A fotogrametria terrestre é o ramo da fotogrametria que utiliza imagens obtidas com câmeras localizadas na superfície terrestre, as quais podem estar acopladas a tripés, bastões, suspensas em torres ou escadas ou em outras plataformas. Usualmente nessa técnica os pontos de exposição são acessíveis, diferente de fotos aéreas, de modo que é possível determinar com precisão, por levantamentos

topográficos ou geodésicos, a sua posição espacial no sistema de referência desejado, bem como fixar ou medir a angulação da câmera, sendo muito comum que todos os parâmetros de orientação exterior sejam determinados em campo, dispensando a necessidade de calculá-los posteriormente. Desse modo, a realização de controle terrestre com o estabelecimento de pontos com coordenadas conhecidas pode ser parcialmente substituída pela definição desses elementos de orientação exterior (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

Quando a fotogrametria surgiu, esta ciência só podia ser aplicada na superfície da terra devido às restrições de equipamentos da época e por não existir plataformas que pudessem capturar fotos aéreas dos terrenos. Entretanto, com o surgimento do avião, os mapeamentos por fotos passaram a ser realizados majoritariamente por fotos aéreas, visto que possuem maior conveniência para projeção ortogonal em relação ao eixo Z, consequentemente facilitando a análise da elevação dos pontos, além de aumentar amplitude da área em que podem ser utilizadas. Nesse sentido, uma das principais destinações atuais do imageamento com câmeras terrestres se relaciona com a fotogrametria à curta distância, abrangendo diversas finalidades em outras áreas do conhecimento, como arqueologia (KHALAF et al., 2018), arquitetura (WERNER; SCHAFFALITZKY; ZISSERMAN, 2002), medicina (BAIRAK et al., 2019), odontologia (SANTOSI et al., 2018), entre outras. Ademais, em relação a aplicações topográficas, essa metodologia ainda é utilizada para situações como desfiladeiros profundos ou montanhas muito acidentadas, em que se torna difícil o levantamento com fotos aéreas (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

Em relação ao controle de campo para a fotogrametria terrestre, como os objetos podem estar dispostos cerca de centímetros de distância da câmera até centenas de metros, este pode ser executado de quatro formas distintas. A primeira consiste em realizar todo o controle através da fixação (ou determinação) da posição e orientação da câmera em relação ao sistema de coordenadas de referência do objeto. Dessa forma, como dito anteriormente, os seis parâmetros de orientação exterior são definidos em campo, dispensando a necessidade de serem calculados. Outra metodologia se refere ao uso de pontos de controle na superfície imageada, de forma análoga ao comumente executado na fotogrametria aérea, sendo os elementos de orientação interior e exterior obtidos indiretamente através da restituição fotogramétrica (MOFFITT; MIKHAIL, 1980).

Uma terceira técnica para executar o controle de campo é baseada no uso conjunto das duas anteriores, isto é, parte da orientação é estabelecida por meio do levantamento de campo e a presença de pontos de controle é utilizada para fortalecer a solução da geometria das fotos e permitir a verificação das medições, com o intuito de detectar possíveis erros. Por fim, também pode ser usado o método de controle apenas da escala, por meio de um sistema de coordenadas arbitrário cuja escala do modelo pode ser obtida através do conhecimento de uma ou mais distâncias conhecidas presentes no objeto fotografado. Assim, essas distâncias podem ser definidas através da medição entre pontos alvos da superfície ou do uso de barras de escala com comprimentos previamente estabelecidos (MOFFITT; MIKHAIL, 1980; WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014).

CAPÍTULO 03

STRUCTURE FROM MOTION – MULTI VIEW STEREO

Ao longo das décadas de 1960 e 1970 vários estudiosos de inteligência artificial e visão computacional desenvolveram pesquisas e avanços na área de processamento de imagens, incluindo aqueles que se voltaram para a percepção visual do movimento de superfícies (GIBSON, 1968; JOHANSSON, 1973; BÖRJESSON; VON HOFSTEN, 1973). Assim, Ullman (1979) traz que o problema principal dessa percepção, do ponto de vista computacional, é a interpretação da estrutura tridimensional e do movimento de um objeto através da análise de transformações bidimensionais de suas projeções, sem que nenhuma informação tridimensional seja conhecida, denominado de "*Structure from Motion"* (SfM).

Nesse sentido, para solucionar essa questão, Ullman (1979) estabelece um algoritmo baseado em três etapas para eliminar as ambiguidades que surgem durante esse processo de restituição da geometria: agrupar as imagens em quatro elementos; verificar se esse conjunto possui uma única inferência como sendo um corpo rígido em movimento e, se sim, interpretá-lo como tal; incorporar os resultados obtidos no estágio anterior para inferir adequadamente a estrutura e o movimento do objeto analisado.

Desse modo, pode-se dizer de forma simplificada que a técnica de SfM consiste em determinar, simultaneamente, a localização no espaço em que as imagens foram capturadas e a geometria dos elementos presentes nessas projeções, sem que seja necessário conhecer previamente pontos de controle com coordenadas tridimensionais para descobrir as posições das câmeras no momento de exposição e vice-versa (WESTOBY et al., 2012). Tais algoritmos permitem, então, que o processo de formação de modelos digitais de terrenos (MDTs) seja realizado através de um conjunto de imagens desordenadas e sem estruturas padrões obtidas por câmeras não métricas, que após a correspondência entre os vários pontos de exposição ser estabelecida pelo SfM, resulta em uma nuvem esparsa de pontos que pode ser densificada posteriormente por meio da ferramenta *Multi-View Stereo* (MVS) (STUMPF et al., 2014).

Por desenvolver um processo automatizado e sem requerer a necessidade do rigor de geometria definida e calibração prévia da câmera na aquisição das fotografias,

uma das aplicações inicialmente utilizadas da técnica de SfM foi a reconstrução de superfícies por meio de imagens provenientes da internet, com o intuito de permitir a visualização tridimensional, através de um navegador, de locais ou monumentos de importância histórica e cultural, como o Coliseu (Roma), a Grande Muralha (China), o Monte Rushmore (EUA), a Catedral de Notre-Dame (Paris), entre outros (SNAVELY; SEITZ; SZELISKI, 2006, 2008; SNAVELY, 2008).

Entretanto, com o aprimoramento dos algoritmos, simplificando o processo computacional e, consequentemente, agilizando o processamento dos dados, atrelado aos avanços tecnológicos na fotogrametria digital, foi perceptível o potencial desse método para diversas aplicações nas geociências, passando a ser explorado como uma forma alternativa para a realização de levantamentos de dados espaciais e geração de MDTs (SMITH; CARRIVICK; QUINCEY, 2016; STUMPF et al., 2014).

Com o intuito de validar a precisão métrica e os produtos cartográficos derivados do uso da técnica de SfM-MVS, pesquisadores das ciências geofísicas vêm realizando estudos comparativos com metodologias e instrumentos já consolidados, como receptores GNSS, Sistema de Escaneamento a Laser LiDAR e estações totais (FONSTAD et al., 2013; MICHELETTI; CHANDLER; LANE, 2015b; WESTOBY et al., 2012). Dentre os fatores que influenciam a acurácia desses resultados, como a iluminação, a qualidade das imagens, a câmera e lente utilizada, provavelmente o mais importante é a distância para a superfície fotografada, sendo sugerida por James e Robson (2012) uma precisão relativa de 1:1000, isto é, erros de centímetros em observações realizadas a dezenas de metros do objeto.

Nesse contexto, na última década podemos destacar, entre as aplicações nessa área, o uso de SfM-MVS para o monitoramento de questões ambientais como a análise de domos vulcânicos e do movimento da lava (JAMES; VARLEY, 2012; TUFFEN et al., 2013), a quantificação de perdas de solo e da erosão em voçorocas (CASTILLO et al., 2012; ELTNER et al, 2015), a investigação de falhas geológicas (JOHNSON et al. 2014; TAVANI; CORRADETTI; BILLI, 2016), o monitoramento de deslizamentos de terras (LUCIEER; JONG; TURNER, 2014; NIETHAMMER ET AL. 2012;), estudos de geologia estrutural (BEMIS et al. 2014; VASUKI et al., 2014), observação de movimentos e medições glaciológicas (RYAN et al. 2015; WHITEHEAD; MOORMAN; HUGENHOLTZ, 2013), entre outras.

3.1 RELAÇÃO COM A FOTOGRAMETRIA TRADICIONAL

Dentre as diversas técnicas de levantamentos de dados espaciais para formação de modelos de elevação digitais (topografia clássica com estação total, receptores GNSS, imagens orbitais, LiDAR aéreo e terrestre e fotogrametria convencional) é notório afirmar que o método que inclui a utilização dos algoritmos de *Structure from Motion* e *Multi-View Stereo* possui maiores semelhanças nas etapas de execução do trabalho de campo, bem como das etapas de processamento, com a fotogrametria tradicional (SMITH; CARRIVICK; QUINCEY, 2016).

Esse aspecto se deve ao fato de que muitos princípios inerentes à execução dos processos de SfM e MVS são derivados dos avanços tecnológicos e modelos matemáticos desenvolvidos pela fotogrametria ao longo das últimas décadas, como a condição de coplanaridade usada para relacionar as imagens espacialmente e o ajustamento de feixes (fototriangulação) usado para executar a condição de colinearidade que estabelece uma associação rigorosa entre as fotografias e os objetos (MICHELETTI; CHANDLER; LANE, 2015b).

Entretanto, é importante frisar que a origem dessa metodologia também possui profunda ligação com os desenvolvimentos providos pela comunidade de visão computacional 3D e por esse motivo apresenta diferenças cruciais da fotogrametria tradicional ao longo do seu fluxo de trabalho, tornando-se um processo consideravelmente mais automatizado. Assim, a principal divergência entre essas técnicas é que, enquanto a fotogrametria convencional depende da obtenção de faixas paralelas de imagens sobrepostas, o SfM-MVS é capaz de restituir informações tridimensionais a partir de fotografias adquiridas sem estrutura geométrica, escala ou angulação fixas rigorosamente (WESTOBY et al., 2012).

Ainda, segundo Fonstad et al. (2013), outra distinção entre tais métodos encontra-se na etapa do processamento na qual são inseridas as informações de coordenadas reais tridimensionais da superfície. As equações de colinearidade, que expressam a relação entre um objeto e sua projeção em uma imagem bidimensional, são resolvidas na fotogrametria tradicional após a introdução dos pontos de controle e seus respectivos parâmetros planialtimétricos, exigindo assim a visualização do mínimo de três destes pontos em cada fotografia ou conhecimento dos ângulos de rotação da câmera e sua posição espacial nos momentos de exposição (WOLF; DEWITT; WILKINSON, 2014). Já no caso do algoritmo de SfM-MVS as equações de colinearidade são sempre resolvidas antes da inserção de pontos de controle, visto

que a abundância de pontos conjugados permite que essa restituição ocorra em um sistema de coordenadas de escala arbitrária (FONSTAD et al., 2013).

Portanto, um dos fatores fundamentais que motiva a utilização cada vez maior dos algoritmos de *Structure from Motion* atrelados aos de *Multi-View Stereo* para a geração de MDTs, apesar de apresentar dados espaciais menos precisos que a fotogrametria convencional, consiste na facilidade de sua aplicação, considerando que não requerer o rigor de planejamento e execução em campo de uma estrutura geométrica definida, nem o conhecimento *a priori* de coordenadas de pontos de controle ou de parâmetros da câmera. Desse modo, além de não exigir um conhecimento extremamente especializado, esse método também é consideravelmente menos onerosos devidos aos instrumentos necessários para sua realização serem simples e o processamento de seus dados ser mais automatizado (JAMES; ROBSON, 2012).

3.2 PROCEDIMENTOS DE EXECUÇÃO

Para que o processo de reconstrução das imagens ocorra de forma adequada, é necessário que sejam tomados cuidados no momento de aquisição das fotografias, tanto nos procedimentos de campo quanto na escolha da metodologia e equipamentos a serem utilizados para a realização do levantamento fotogramétrico.

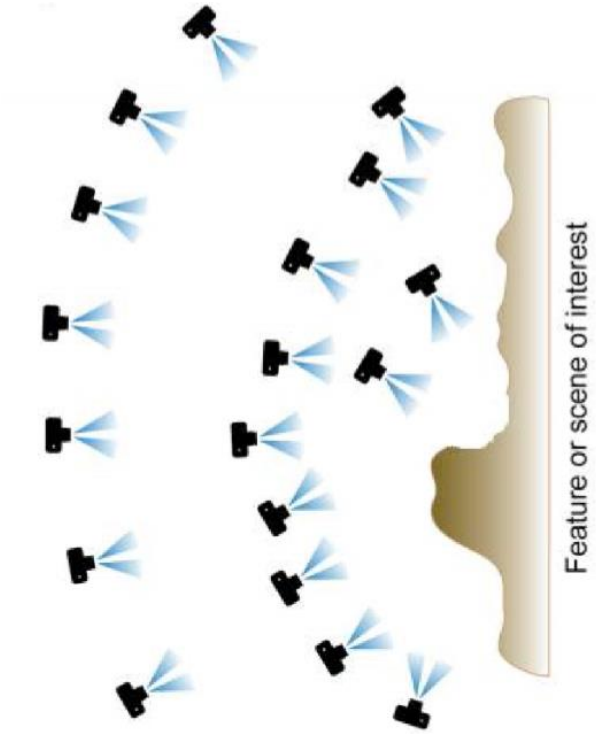
3.2.1 AQUISIÇÃO DA IMAGEM

Devido aos avanços nos algoritmos de SfM-MVS existentes atualmente, uma grande variedade de modelos de câmera não-métricas pode ser empregada para a obtenção das fotografias em campo, destacando-se que o uso de câmeras não objetivas digitais (DLSR) com lente de distância focal fixa irão gerar cenas com maior qualidade e resolução. (MICHELETTI; CHANDLER; LANE, 2015b). Entretanto, isso não significa que em todos os casos serão gerados MDTs significativamente melhores, considerando que normalmente imagens obtidas com altas resoluções precisarão ser redimensionadas para evitar que o processamento seja excessivamente lento, reduzindo assim o nível de detalhamento da imagem (WESTOBY et al., 2012).

Quanto à disposição dos pontos de exposição, é necessário que estes estejam bem distribuídos na área que se deseja representar tridimensionalmente, de modo a garantir que haja uma superposição adequada e que cada feição esteja presente em no mínimo três fotos. Além disso, recomenda-se que as imagens sejam adquiridas com diferentes escalas e angulações variadas, especialmente em locais que a

superfície é parcialmente encoberta por outros objetos ou por outra porção do próprio relevo. Para isso, inicialmente devem ser capturadas cenas mais abrangentes (menor escala) que representem toda a região desejada e em seguida, mais próxima dos objetos para garantir o nível de detalhamento requerido, bem como permitir imagear feições oclusas em outras perspectivas, como exemplificado pela Figura 03 (MICHELETTI; CHANDLER; LANE, 2015b).

Figura 03 – Aquisição de imagens.



Fonte: Micheletti, Chandler e Lane (2015b).

Rauguste e Olsen (2013) também discutem a importância de observar a porcentagem de superposição que deve ser aplicada, por ser um dos fatores que mais influencia a qualidade do modelo gerado. Assim, é preciso realizar um planejamento para obter o máximo de fotografias possível, mas ponderando o fato de que quanto maior o conjunto de dados maior será o desempenho computacional exigido. Por isso, é indicado que a sobreposição esteja entre 70 e 90 % em contextos que se deseja alcançar precisões sub-métricas, pois valores inferiores não são suficientes para descrever a cena adequadamente e acima de 90 % não compensam o custo-benefício do tempo que será acrescido no processamento. Entretanto, quando a intenção é apenas reconstituir um objeto tridimensionalmente para fins de visualização, uma superposição de 40 a 50% pode vir a ser utilizada.

Também deve ser levado em consideração se a superfície possui textura apropriada para ser reconstituída com base nos algoritmos de SfM-MVS. Isso se deve ao fato de que identificadores automáticos de feições são baseados no reconhecimento de traços singulares em imagens superpostas, dessa forma, a presença de superfícies homogêneas, transparentes, reflexivas ou excessivamente planas e de porções cobertas por vegetação, areia ou neve, podem impedir os algoritmos de executar uma correta correspondência entre pontos. Outros fatores que influenciam negativamente esse processo incluem variações na iluminação (derivadas do deslocamento do sol, da movimentação de nuvens ou do próprio operador da câmera que podem causar sombras sobre o terreno) e de mudanças nos alvos (devido à movimentação de pessoas e veículos na frente das feições ou de sua alteração por conta de ventos que movimentam a vegetação, por exemplo), pois um mesmo objeto aparece diferente nas imagens, fazendo com que o algoritmo não associe como sendo a mesma forma (BEMIS et al. 2014).

Ademais, é de extrema importância que as fotografias sejam obtidas do maior número de posições distintas possível, visto que a variação de direções origina um conjunto de imagens com geometria forte, importante para executar as etapas de restituição dos parâmetros da câmera e das coordenadas dos pontos. Contudo, é preciso ter em mente que a diferença de angulação entre imagens sobrepostas, se for muito grande, irá impedir que as feições sejam correlacionadas porque a textura irá ser distorcida de modo que não pareça a mesma. Assim, para mudanças no ponto de exposição superiores à 30° a capacidade de detecção pode cair drasticamente, portanto sendo recomendado que a angulação máxima das fotos seja em torno de 25 a 30° (MOREELS; PERONA, 2006).

3.2.2 PONTOS DE CONTROLE

Para a obtenção das coordenadas dos pontos de controle, podem ser utilizados métodos e instrumentos de levantamento de informações tridimensionais já consolidados, como a estação total, os receptores GNSS por posicionamento relativo ou absoluto, imagens obtidas por fotogrametria tradicional, laser scanners terrestre ou aéreo ou mesmo por sensoriamento remoto proveniente de sensores orbitais. Por isso, a escolha da metodologia para determinação dos parâmetros espaciais dos pontos de controle dependerá da precisão na qual devem ser obtidos, podendo inclusive ser utilizado mais de um tipo de fonte de dados para a mesma aplicação

(FERRER et al., 2017; JAVERNICK; BRASINGTON; CARUSO, 2014; MICHELETTI; CHANDLER; LANE, 2015a)

Quanto à materialização dos pontos de controle para posterior identificação nas fotografias, podem ser escolhidas feições do próprio local que sejam de fácil reconhecimento, por exemplo, meio-fio, sinalização horizontal de rodovias, esquinas de quadras e detalhes arquitetônicos em regiões urbanizadas (DANDOIS; ELLIS, 2010; JAMES; APPLEGARTH; PINKERTON, 2011). Contudo, em circunstâncias que não existam pontos suficientemente distinguíveis da textura geral da cena, ou mesmo quando se tem a intenção de evitar prováveis ambiguidades e associações errôneas e garantir maior precisão na aquisição das coordenadas, são implantados marcos artificiais com centroides bem definidos, de modo que possam ser facilmente detectados posteriormente (CASTILLO et al. 2015; NIETHAMMER et al. 2012; WESTOBY et al., 2012).

3.2.3 PLATAFORMAS PARA IMPLANTAÇÃO DA CÂMERA

Por ser um objeto normalmente leve, ao contrário de instrumentos como o LiDAR, existem diversas opções de plataformas nas quais podem ser equipadas as câmeras para fotografar determinada superfície. Essa escolha também deve estar diretamente ligada às especificações de cada caso, dependendo principalmente da extensão da área a ser imageada e da escala em que se deseja obter as cenas, isto é, da distância média da superfície em que devem ser capturadas (MICHELETTI; CHANDLER; LANE, 2015b; SMITH; CARRIVICK; QUINCEY, 2016).

Na fotogrametria as plataformas tradicionais, como aviões, são muito caras, podendo inviabilizar a execução do levantamento em certos contextos. Nesse sentido, para aplicações de curto-alcance que exigem precisões posicionais em torno de decímetros ou centímetros, surgiram outras plataformas mais leves, menos onerosas e muitas das quais podem ser construídas pelos próprios profissionais que as utilizam. No caso de fotogrametria aérea, podem ser usados objetos não tripulados como pipas, balões, dirigíveis, aeromodelos e drones, principalmente em locais de difícil acesso. Já em situações que a porção fotografada é pequena e o nível de detalhamento requerido exige que as imagens sejam obtidas com escala maior, a câmera pode ser acoplada em mastros, postes ou mesmo ser usada diretamente pelo operador (JAMES; ROBSON, 2012, 2014; WESTOBY et al., 2012).

3.2.3.1 PLATAFORMAS AÉREAS

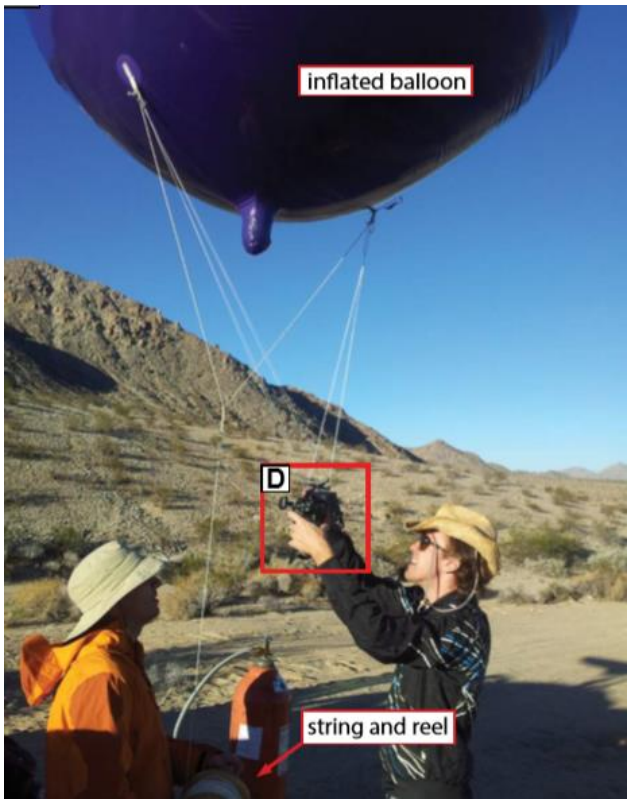
A utilização de câmeras digitais em pipas é comumente chamada de Fotografia Aérea com Pipa - KAP (*Kite Aerial Photography*). Essa técnica apresenta a vantagem de ser facilmente transportável devido à leveza e o tamanho, além de ser relativamente barata quando comparada a outras plataformas e poder ser controlada por uma linha presa a um carretel (Figura 04). Por esse motivo vem sendo empregada em vários estudos na geração de modelos tridimensionais para mapeamento (BRYSON et al., 2013; CURRIER, 2015), estudo de vegetação (DANDOIS; ELLIS, 2010), monitoramento de voçorocas (MARZOLFF; RIES; ALBERT, 2002), estudos de diferentes tipos de terrenos (SMITH; CHANDLER; ROSE, 2009), e análises de geomorfologia periglacial (BOIKE; YOSHIKAWA, 2003), bem como aplicações para arqueologia (SCHLITZ, 2004). O principal ponto desfavorável da KAP é que a velocidade do vento no local deve ser estável, uma vez que ventos inconstantes impedem uma superposição regular entre as imagens e, consequentemente, uma cobertura adequada para fotogrametria (GREEN; BEVAN; SHAPLAND, 2014).

Figura 04 – Câmera acoplada à pipa.

Fonte: Smith, Chandler e Rose (2009).

Em relação aos balões de hélio e dirigíveis (Figura 05), seu uso é recomendado devido à simplicidade de trabalhar com essa plataforma e por ser mais fácil de posicionar a câmera lateralmente e na altitude desejada do que a pipa, entretanto, podendo ser guiado por uma só pessoa apenas em condições de vento moderado, visto que a presença de um segundo operador melhora a eficiência de imageamento da área e torna-se indispensável em condições atmosféricas adversas (JOHNSON et al., 2014). Quanto ao uso de dirigíveis, a utilização de Helikites, combinação de um balão de hélio e pipa desenvolvido pela empresa Allsopp Helikites, vem sendo validada por pesquisadores das geociências (FONSTAD et al., 2013; VERICAT et al., 2018) devido a facilidade de ser orientado por uma única pessoa através da corda leve ligada ao aparelho e uma bobina. Contudo, as maiores desvantagens da utilização desse método consistem na dificuldade de transportar essa plataforma para áreas remotas e no custo relativamente alto do hélio, necessário para manter o balão no ar (BOIKE; YOSHIKAWA, 2003).

Figura 05 – Balão equipado com câmera.



Fonte: Johnson et al. (2014).

Ainda para a fotogrametria aérea, o uso de aeromodelos e, principalmente, de drones (Figura 06) vem sendo cada vez mais consolidado para realizar a modelagem

tridimensional de superfícies (QU; HUANG; ZHANG, 2018; ROSNELL; HONKAVAARA, 2012). Denominados Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), esses instrumentos são normalmente controlados remotamente por rádio ou podem ser programados para voar conforme uma rota previamente planejada, requerendo pouca interferência do piloto (JOHNSON et al., 2014). Quando comparados a outras plataformas, esses aparelhos apresentam melhor padronização da cobertura da superfície imageada, transporte mais facilitado inclusive em regiões de difícil acesso devido ao tamanho pequeno do equipamento e seu uso é menos influenciado por condições temporais, sendo por isso amplamente aplicado em estudos geodésicos. Entretanto, a desvantagem da utilização de drone em relação às demais plataformas citadas é relacionada ao seu custo mais alto e necessidade de regularização para usa utilização segundo as normas de cada país (BEMIS et al., 2014; ELTNER et al, 2015; NIETHAMMER et al., 2012; RYAN et al., 2015; VASUKI et al., 2014).

Figura 06 – Câmera acoplada a VANT.

Fonte: Rosnell e Honkavaara (2012).

3.2.3.2 PLATAFORMAS TERRESTRES

Quando a representação tridimensional desejada consiste em fachadas de edificações, objetos isolados ou áreas com extensão longitudinal por volta de dezenas de metros pode ser utilizada a fotogrametria terrestre para imagear essas superfícies. Para isso, um dos instrumentos no qual pode ser acoplada uma câmera são mastros ou bastões telescópicos (Figura 07) com o intuito de capturar fotografias aéreas oblíquas de baixa altitude em complemento a imagens obtidas apenas no solo (MATHEWS; JENSEN, 2012). Além disso, são equipamentos baratos, com bom custo-benefício, portáteis e que também podem ser utilizadas como plataformas

aéreas, com a desvantagem que a altura de imageamento fica restrita a 15-20 metros (VERHOEVEN, 2009).

Figura 07 – Bastão telescópico com câmera.

Fonte: Mathews e Jensen (2012).

Outra variação desses bastões, são bipés, tripés e quadripés telescópicos, os quais conferem melhor estabilidade para câmeras em fotografias terrestre, evitando o efeito de arrastamento que pode interferir na qualidade da cena e garantindo a horizontalidade de seu eixo em relação ao solo (FERNANDES, 2010; PALERMO; LEITE, 2013). Dentre esses, normalmente o tripé é mais utilizado para diversas aplicações em fotogrametria terrestre porque é mais estável que o bipé e mais fácil de ser encontrado no mercado que o quadripé (BASTIAN, 2015; CENTENO; WUTKE; KERSTING, 2004; HASHIM et al. 2012; JAMES; ROBSON, 2012).

Por ser uma técnica que não exige rigor posicional no momento de captura da imagem como na fotogrametria convencional, o SfM permite também que as cenas sejam adquiridas sem o uso de nenhuma plataforma, ou seja, diretamente das mãos do fotógrafo. Apesar de ser limitado ao uso em áreas pequenas e em contextos que não precisem de imagens capturadas de perspectivas aéreas, podendo ser inteiramente obtidas a partir do solo, essa possibilidade permite maior liberdade de operação já que não exige o transporte de equipamentos e mão de obra especializada, além de não ter custo adicional de plataformas. Contudo, como não proporcionar nenhum tipo de estabilidade externa, a precisão final do modelo pode ser comprometida pela presença de arrastamento nas fotografias, requerendo maior cuidado durante o levantamento (MICHELETTI; CHANDLER; LANE, 2015a, 2015b; MILLER; MORGENROTHB; GOMEZ, 2015).

3.2.3 SOFTWARES

Existem diversas ferramentas para processamento de imagens com o uso de algoritmos de SfM-MVS, incluindo serviços *online*, *softwares* gratuitos de código aberto e pacotes comerciais. A Tabela 01 apresenta as principais plataformas de aplicação dessa abordagem disponíveis atualmente. A escolha do programa a ser utilizado depende diretamente das especificações e requisitos computacionais

disponíveis, bem como do tipo de aplicação a qual se destina o serviço realizado, isto é, que análise deseja ser executada no produto gerado através desse processamento e com que nível de profundidade (MICHELETTI; CHANDLER; LANE, 2015b).

Tabela 01 – Principais *softwares* que utilizam algoritmos de SfM-MVS.

SOFTWARE	**OBSERVAÇÕES**
GRATUITOS	
Bundler Photogrammetry Package[a, b]	Sem interface gráfica do utilizador. Disponível apenas para Windows.
SFMToolkit3[a, b]	Similar ao Bundler Photogrammetry Package.
Python Photogrammetry Toolbox (PPT)[a, b]	Interface gráfica ao usuário e *scripts* em Python, com distribuição em Linux.
VisualSFM[b]	Interface gráfica ao usuário avançada para Windows, Linux e Mac. Com opção de georreferenciamento, mas modelo de câmera é mais restrito que no Bundler.
3DF Samantha	Apenas SfM, mas com modelos mais avançados de câmera que os demais *softwares* livres. Formas de exportção compatíveis com vários algoritmos de densificação.
SERVIÇOS ONLINE	
Photosynth	Desenvolvido a partir do Bundler. Apenas SfM, sem densificação. Incorpora uma grande variedade de imagens, mas a custo da acurácia da resconstrução.
Arc3D	Usado principalmente para projetos de patrimônios culturais
CMP SfM Web service[a]	
Autodesk 123D Catch	Opções de pós-processamento limitadas. Usado em aplicações geofísicas
Pix4D	Também disponível como *software offline*.
My3DScanner	
Micmac	Apresenta o fluxograma completo de SfM-MVS, com modelos complexos dos parâmetros instrísecos da câmera.
Ecosynth	Usado para mapeamento de vegetação.
COMERCIAIS	
Photoscan/Metashape	Pacote comercial completo para aplicação de SfM-MVS.
Acute3D	
PhotoModeler	Originalmente criado para fotogrametria à curta distância que incorporou a implementação de SfM.
3DF Zephyr Pro	Mecanismo subjacente para SfM é o 3DF Samantha.

Fonte: Adaptada de Bemis et al., 2014 e Smith, Carrivick e Quincey (2016).
Notas: [a] Usa Bundler (http://www.cs.cornell.edu/~snavely/bundler/) para computar o SfM.
[b]Usa *Patch-based Multi-view Stereo* (https://www.di.ens.fr/pmvs/) para computar o MVS.

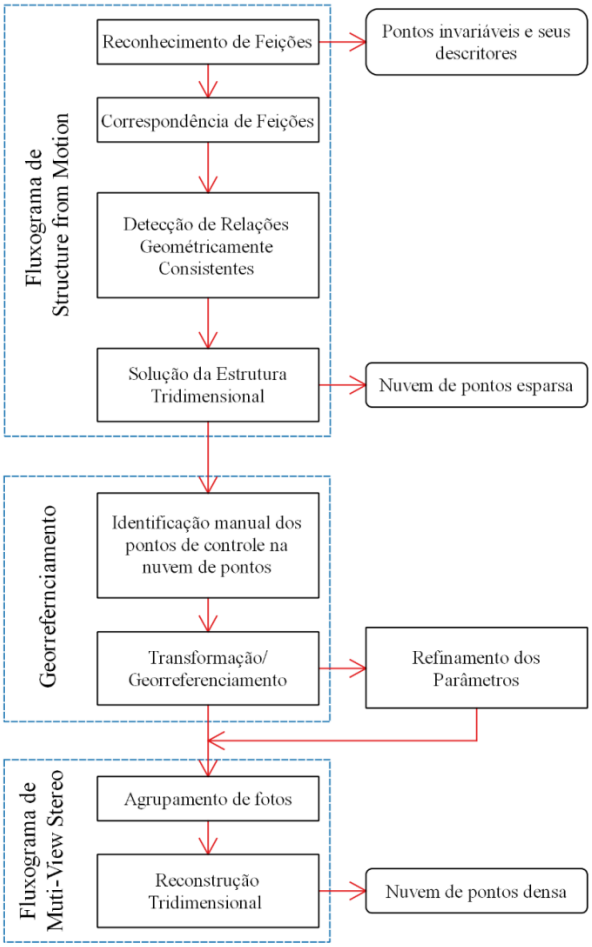
No referente à estudos voltados para as geociências, podemos destacar exemplos da utilização do *SFMToolkit3* por Westoby et. al (2012), do *Bundler Photogrammetry Package* por James e Robson (2012), do *Autodesk 123D Catch* por Micheletti, Chandler e Lane (2015a), do *VisualSfM* e do *Micmac* por Stumpf et al. (2014), do *Ecosynth* por Dandois e Ellis (2010), do *Photosynth* por Rosnell e Honkavaara (2012) e do *Agisoft Photoscan* por Lucieer, Jong e Turner (2014), Tavani, Corradetti e Billi (2016), Javernick, Brasington e Caruso (2014) e Fonstad et al. (2013).

Dentre as plataformas citadas, é importante ressaltar que alguns serviços *online* foram removidos da internet pelos seus desenvolvedores e não se encontram mais disponíveis para uso, como o *Photosynth*, o *Autodesk 123D Catch* e o *My3DScanner*, além do software livre *Bundler Photogrammetry Package*.

3.3 ETAPAS DE PROCESSAMENTO

Por apresentar diversos algoritmos e formas distintas para a resolução da questão central do SfM-MVS (identificar objetos tridimensionais através de imagens obtidas de diferentes perspectivas ou de um sensor com movimento irregular), as etapas de processamento dos dados no uso dessa aplicação geralmente variam conforme o(s) *software*(s) utilizado(s), contudo conservando aspectos fundamentais entre si que norteiam o fluxo de trabalho a ser realizado e encontram-se presentes ao longo de seu desenvolvimento, como mostra a Figura 08 (STUMPF et al, 2014).

Figura 08 – Fluxograma padrão do SfM-MVS



Fonte: Adaptado de Smith, Carrivick e Quincey (2016).

Nesse sentido, podemos dividir a geração de modelos de elevação do terreno através de imagens interpretadas por meio deste método em sete passos principais: identificação de feições, correspondência de pontos de interesse reconhecidos em múltiplas fotografias, detecção de relações geometricamente consistentes, execução dos algoritmos de *Structure from Motion* para a solução da estrutura tridimensional, georreferenciamento e escala do modelo, refinamento dos parâmetros e utilização dos algoritmos de *Multi-View Stereo* para densificação da nuvem de pontos (SMITH; CARRIVICK; QUINCEY, 2016).

3.3.1 RECONHECIMENTO DE FEIÇÕES

Inicialmente o conjunto de fotos inseridas nos *softwares* de processamento com SfM-MVS irá ser submetido a um reconhecimento de feições, as quais serão associadas a um identificador único, independente da rotação ou escala da imagem analisada, sendo este processo consideravelmente facilitado com a correção de

distorções nas imagens e a normalização geométrica do local onde está presente a feição (SNAVELY, 2008).

Em outras palavras, o processo de procura e identificação de feições correspondentes nas imagens consiste nos seguintes passos principais: primeiramente pontos são selecionados em localizações salientes como interseções e cantos; em seguida a vizinhança dessas feições é caracterizada por um vetor, que deve ser de fácil diferenciação e ao mesmo tempo pouco influenciado (robusto) por ruídos, deformações geométricas e identificações errôneas, porque esses vetores são associados em cenas diferentes (BAY et al., 2008).

Assim, existem diversas técnicas para realizar esse processo de identificação, como SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*) proposta por Lowe (1999), SURF (*Speeded-Up Robust Features*) por Bay et al. (2008), BRIEF (*Binary Robust Independent Elementary Features*) por Calonder et al. (2010) e LDAHash (*Linear Discriminant Analysis*) por Strecha et al. (2012). Tais metodologias são baseadas na mesma sequência de etapas, variando, entretanto, a forma de reconhecimento das feições, sua capacidade de repetitividade para detecção de pontos em diferentes condições, as características dos identificadores (vetores) gerados, sua robustez, entre outros fatores que influenciam a qualidade da análise realizada e a velocidade do processamento.

Nesse sentido, apesar de terem sido desenvolvidos vários métodos após a criação da SIFT, com o intuito de diminuir o desempenho computacional exigido e agilizar a execução dessa etapa, esse ainda continua sendo o mais utilizado dentro do fluxograma do SfM-MVS por ser mais eficaz em identificar feições em cada fotografia que são invariantes a rotação e escala e parcialmente a mudanças angulares na perspectiva das imagens e condições de iluminação, tendo se mostrado eficiente na detecção de objetos com variação de até 40° nas perspectivas das imagens (SMITH; CARRIVICK; QUINCEY, 2016).

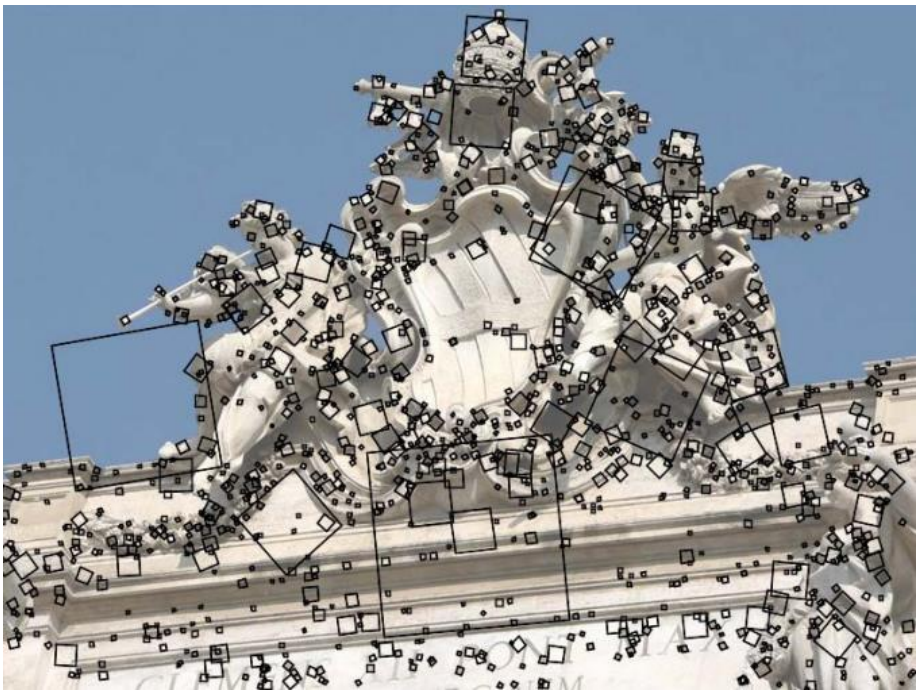
Assim, um dos motivos para o melhor desempenho dessa abordagem é que são realizadas transformações nos gradientes das cenas que as tornam amplamente insensíveis a variações na luminosidade e diferentes angulações, permitindo então que os pontos de interesse sejam reconhecidos automaticamente dentre todas as cenas importadas e associados a um vetor identificador único (LOWE, 2004).

3.3.2 CORRESPONDÊNCIA DE FEIÇÕES

Durante a análise de um arranjo de fotografias, geralmente todos os pontos de interesse não são retratados por todas as imagens, por isso é necessário utilizar vetores para descrevê-los e estabelecer um limite no qual seja verificado a existência de relações entre as feições. Para isso, é determinado um valor mínimo para o raio baseado na distância euclidiana desses vetores de pontos vizinhos mais próximos, de modo a potencializar as chances de que as associações sejam adequadamente realizadas pelo *software* (SMITH; CARRIVICK; QUINCEY, 2016).

A metodologia de SIFT foi assim denominada por transformar os dados das fotografias em coordenadas invariáveis, independente da escala, relacionadas às feições locais (Figura 09). Seu processo consiste em extrair pontos identificáveis de um conjunto de imagens e armazená-los em um banco de dados e, posteriormente, comparar individualmente as feições de uma nova foto a esses pontos presentes no banco. Assim, por serem extremamente distintos, existe uma alta probabilidade desses pontos reconhecidos serem corretamente associados mesmo em conjuntos com grande volume de imagens (LOWE, 1999; SNAVELY, 2008).

Figura 09 – Conjunto de feições identificadas pelo SIFT.



Fonte: Snavely (2008).

No entanto, esse processo pode requerer alto desempenho computacional por ser muito complexo quando é exigida uma solução exata de vetores com várias

dimensões. O algoritmo de SIFT, por exemplo, apresenta grande diferenciação porque é capaz de armazenar informações radiométricas (intensidade de cores) da vizinhança das feições com até 128 dimensões (BROWN; LOWE, 2005; LOWE, 2004).

Por isso, comumente são usadas técnicas para particionar esses dados de modo a acelerar essa etapa e demandar menos desempenho dos *hardwares*. Além disso, no método SIFT, as amostras de feições extraídas das imagens de maior escala, por possuírem maior nível de detalhamento, recebem maior peso das geradas através das fotos de menor escala no processo de comparação com as demais fotografias, bem como são usadas para filtrar as feições de modo a identificar quais são os vizinhos mais prováveis nas imagens capturadas com maior linha de base, auxiliando no processo de relacionamento de seus pontos (LOWE, 1999).

3.3.3 DETECÇÃO DE RELAÇÕES GEOMETRICAMENTE CONSISTENTES

Após executada a comparação e associação das feições na etapa anterior, é imprescindível que seja averiguado se houve correspondências realizadas erroneamente para que estas possam ser corrigidas ou removidas. Como exemplos dos parâmetros estatísticos mais utilizados para a verificação de dados anômalos podem ser citados: Menor Mediana dos Quadrados dos Resíduos (MMQ), RANSAC (*Random Sample Consensus* em inglês) e a Transformação de Hough (LOWE, 2004).

O tratamento estatístico de dados pelo método clássico de minimização da soma dos quadrados dos resíduos, proposto por Gauss e denominado de Métodos dos Mínimos Quadrados ou Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) é considerado um critério para análise de observações confiáveis e precisas e se tornou um dos pilares da análise estatística. Entretanto, na aplicação de SfM-MVS, dificilmente irão existir conjuntos de dados ideais que cumpram com as hipóteses necessárias para que essa modelagem funcione como previsto na teoria, de modo que um único dado discrepante pode ter grande influência na estimativa de uma distribuição através do MQO e por isso vários autores vêm discutindo alternativas para substituí-lo pelos chamados estimadores robustos, que são menos sensíveis à presença de observações anômalas (ROUSSEEUW, 1984).

Normalmente, em análises de imagens com visão computacional, os detectores de feições podem cometer erros de medição, quando os pontos são devidamente identificados, mas algum de seus parâmetros (como sua localização espacial na cena) são calculados com pequenas discrepâncias, e de classificação, quando a ocorrência

de pontos é reconhecida incorretamente. Para o caso dos erros relacionados às propriedades métricas dos pontos, sua distribuição segue a distribuição normal na maioria dos casos, contudo, as classificações realizadas de forma incorreta são erros grosseiros, que afetam de forma mais expressiva a interpretação das projeções nas fotografias e que não possuem padronização estatística. Por esse motivo, os modelos clássicos de estimadores como o MQO não são recomendados para aplicações referentes à análise de imagens com dados provenientes de identificadores de feições automáticos, como é o caso do SfM-MVS (FISCHLER; BOLLES, 1980; MEER; MINTZ; ROSENFELD, 1991).

Assim, novos parâmetros estatísticos foram desenvolvidos derivados do MQO com o intuito de trabalhar com conjuntos de dados que possuam maiores informações discrepantes sem que isso interfira de forma significativa na análise estatística. Uma dessas alternativas é a substituição do quadrado dos resíduos por seu valor absoluto (módulo), contudo o uso do método de Menor Mediana dos Quadrados dos Resíduos (MMQ) ganhou bastante visibilidade por abranger a possibilidade de trabalhar com até 50% das observações contaminadas sem que o estimador assuma valores muito discrepantes do ideal (MASSART et al., 1986; ROUSSEEUW, 1984)

Outro exemplo de critério muito utilizado para estudos com identificação de estruturas tridimensionais a partir de imagens digitais é o RANSAC. Analisando certo número de observações, em vez de selecionar um maior conjunto de pontos para chegar a uma solução provisória e posteriormente eliminar os dados que parecem ser inválidos, o processo básico desse estimador consiste em usar inicialmente um subconjunto aleatório com o mínimo de dados para solucionar o modelo e, quando for possível, expandir esse conjunto com as observações consistentes, realizando, por fim, o ajustamento baseado em dados providos apenas de erros de medição. De forma similar ao MMQ, o uso desse estimador também é adequado para casos em que até metade da amostra de dados analisadas seja provida de erros grosseiros (FISCHLER; BOLLES, 1980).

Além dessas aplicações, em situações que devem ser reconhecidos objetos pequenos ou que estão quase completamente ocultos, tais superfícies precisam ser identificadas com o mínimo possível de correspondências de feições, sendo necessário que sejam modeladas com conjuntos de associações com mais de 99% de dados errôneos. Para ser capaz de trabalhar com esses casos, Lowe (2004) traz a possibilidade de utilizar a transformação proposta por Hough (1962), na qual a

imagem é dividida em grupos tão pequenos que uma textura complexa é transformada em segmentos de reta, de modo que cada um desses conjuntos indica uma posição do objeto que seja consistente com essas feições. Assim, quando mais de um grupo determinar a mesma posição, existe uma probabilidade consideravelmente maior de que essa correspondência esteja correta do que se fossem analisados pontos individualmente.

Portanto, a escolha de qual modelagem estatística das imagens de uma superfície é mais adequada para determinado caso específico irá depender principalmente da qualidade das fotografias adquiridas, da aplicação para a qual serão utilizadas, da frequência de ruídos ou fatores que possam levar a interpretações errôneas da forma dos objetos projetados (a exemplo da iluminação), da presença de superfícies parcialmente ocultas, do nível de detalhamento tridimensional que deve ser extraído das cenas, a origem e o tipo de erros presentes nos dados analisados, bem como a forma que se comportam e a probabilidade de existirem dados anômalos na distribuição (MEER; MINTZ; ROSENFELD, 1991)

3.3.4 SOLUÇÃO DA ESTRUTURA TRIDIMENSIONAL

Com a detecção, correspondência e tratamento estatístico das feições já executadas nas imagens da superfície analisada, pode-se finalmente dar início à etapa do fluxograma correspondente à resolução do problema do *Structure from Motion*. Em outras palavras, nesse momento ocorrerá a reconstituição simultânea da posição da câmera, de seus parâmetros e da geometria dos objetos sem que seja requerido o conhecimento de nenhuma dessas informações inicialmente, cujo produto final consiste em uma nuvem de pontos esparsa gerada com escala e sistema de coordenadas arbitrárias (WESTOBY et al, 2012).

Primordialmente, a questão intrínseca ao SfM consiste em resolver uma estrutura a partir de um conjunto de imagens sem que haja nenhum dado tridimensional que possa identificar as superfícies presentes. Isso significa que irão existir infinitas soluções de movimentos sofridos pelos objetos descritos por essas cenas. Com o intuito de eliminar essa ambiguidade e definir uma solução única para essa situação, a qual seja possível assumir como correta em quase todos os casos, Ullman (1979, p. 409, tradução nossa) propõe a denominada suposição de rigidez: “qualquer conjunto de elementos submetidos a uma transformação bidimensional que possui uma única interpretação como um corpo rígido se movendo no espaço, deve ser interpretado como tal”.

A partir desse princípio, surge então a necessidade de incorporá-lo a um esquema que irá corretamente inferir a geometria do objeto analisado. Assim, a versão mais simples do problema do SfM envolve apenas duas imagens, cujas posições das câmeras e coordenadas relativas das superfícies podem ser determinadas com a associação de no mínimo cinco pontos presentes em ambas, ocorrendo de forma análoga para casos com três cenas e o uso de quatro pontos não coplanares. No entanto, para um conjunto de várias imagens essa solução torna-se mais complexa, existindo então diversos algoritmos desenvolvidos para essa finalidade (SNAVELY, 2008; ULLMAN, 1979).

Uma situação em que as fotografias são obtidas através de uma sequência específica, como através da extração de *frames* de um vídeo, por serem imagens necessariamente consecutivas podem ser analisadas em pares, de modo que nas duas primeiras são utilizados os cincos pontos não coplanares para restituir a posição dos demais através de triangulação e dos pontos de exposição e, posteriormente, incorporar os demais *frames*. O uso dessa técnica, entretanto, é limitado para casos em que a câmera utilizada esteja devidamente calibrada e a sequência de cenas não seja muito extensa, bem como não formem circuitos circulares, ou seja, que em dado momento sofram *loopings* e voltem para o mesmo local (SNAVELY, 2008).

Já o método de fatorização requer que as fotografias utilizadas apresentem uma projeção ortográfica, ou seja, o componente de movimentação referente à translação da câmera ao longo do eixo ótico não pode ser reconstituído por essa abordagem e, por isso, deve ser consideravelmente pequeno quando comparado à extensão imageada. Apesar disso, essa limitação permite que a qualidade do reconhecimento das formas e dos cinco parâmetros de movimentação remanescente melhore substancialmente. O uso dessa técnica consiste basicamente em representar uma sequência de imagens como uma matriz de observações composta pelas coordenadas verticais e horizontais dos pontos reconhecidos em determinado número de cenas, de modo que, se tais coordenadas forem medidas a partir do centroide dos objetos, esta pode então ser fatorada como o produto de duas matrizes: uma referente à rotação da câmera e outra à forma da superfície retratada (TOMASI; KANADE, 1992).

Dentre as restrições desse método, tem-se que foi desenvolvido para ser aplicado apenas para modelos ortográficos, podendo ser usado em imagens com perspectiva, mas sem que haja uma resolução direta da geometria. Outra ressalva é

que, para que a matriz de medições seja preenchida completamente (permitindo que esta seja fatorada de modo direto) é necessário que todos os pontos sejam visíveis em todas as imagens. Entretanto, na maioria dos casos práticos, não é possível identificar algumas feições devido à presença de oclusões, sendo propostos algoritmos iterativos para solucionar esse problema. Além disso, incluir estimadores robustos no modelo de fatorização normalmente é um processo indispensável quando existem índices elevados de dados anômalos presentes nas observações, entretanto que se torna complexo e que diminui a qualidade dos dados (BUCHANAN; FITZGIBBON, 2005; SNAVELY, 2008).

Nesse contexto, com o intuito de utilizar uma técnica de resolução da estrutura geométrica e dos parâmetros dos pontos de exposição que pudesse ser aplicada em situações mais genéricas, o método de ajustamento de feixes (*bundle adjustment* em inglês) é amplamente aplicado. Essa denominação surge por conta dos feixes de raios de luz que partem de cada ponto tridimensional e convergem para o centro das câmeras, sendo assim refinados simultaneamente em relação à variação da geometria e das propriedades da cena. Além disso, esse processo ocorre por meio da otimização do ajustamento de forma que a reconstituição estimada dessas informações seja realizada através da minimização das funções de custo que quantificam a modelagem dos erros, isto é, do desempenho computacional exigido (TRIGGS et al., 2000).

Uma das principais vantagens dessa metodologia consiste na amplitude de aplicações que pode ser usada, incluindo diversos tipos de fontes de dados, câmera, cenas, feições e estimadores, bem como não apresenta problema em casos de pontos oclusos ou associados incorretamente. Ademais, apresenta altos índices de acurácia e eficiência devido ao desenvolvimento de um bom método de controle de qualidade e de algoritmos que podem ser executados mesmo em casos complexos ou com grande volume de fotografias. O ajustamento de feixes pode ser utilizado inclusive para reconstituir a trajetória da câmera em gravações de vídeo em tempo real, prevenindo o que os erros sejam propagados e acumulados no processo. Por isso, esse método vem se consolidando como a principal técnica para realizar a etapa de reconstrução geométrica inicial e estimação dos parâmetros de rotação, translação e calibração da câmera (ENGELS; STEWÉNIUS; NISTÉR, 2006; TRIGGS et al., 2000).

3.3.5 ESCALA E GEORREFERENCIAMENTO

Como a nuvem esparsa de pontos gerada na etapa de SfM é obtida com escala e coordenadas espaciais arbitrárias, é necessário que essas propriedades sejam transformadas para o sistema de referência desejado. Para contextos nos quais o referenciamento não é relevante, esse produto pode ser apenas submetido à escala, sendo então necessário o conhecimento de pelo menos uma distância real presente ao longo das cenas retratadas, mas geralmente recomenda-se a inserção de mais observações, de modo que os erros possam ser minimizados nesse processo. Entretanto, quando é imprescindível que o modelo esteja associado a um sistema específico (por exemplo, a um *datum* geodésico), deve-se ter o conhecimento de no mínimo três pontos com coordenadas nesse sistema para que possam ser resolvidos os três parâmetros de rotação e três de translação global. Em situações que deva ser executada a submissão à escala e o georreferenciamento, normalmente são utilizados mais que três pontos de controle, também com o intuito de tratar estatisticamente os dados fornecidos (JAMES; ROBSON, 2012).

Nesse sentido, para determinar a quantidade de pontos que devem ser medidos no local estudado, alguns requisitos como a extensão da área, a precisão exigida, a distância da câmera em relação à superfície fotografada e a finalidade à qual será aplicada essa técnica precisam ser considerados e, portanto, analisados para cada conjuntura de modo individual. É notório que essas transformações serão mais fidedignas se tais pontos estiverem bem distribuídos e encobrirem todo o setor imageado, no entanto, ao contrário da fotogrametria clássica, não há a necessidade da presença de pontos de controle em cada fotografia, visto que tais coordenadas são exigidas apenas para georreferenciar o produto tridimensional e não para resolver as equações de colinearidade (FONSTAD et al., 2013; SMITH; CARRIVICK; QUINCEY, 2016).

Alternativamente, a etapa de georreferenciamento pode ser desempenhada antes do processo de reconstrução da estrutura tridimensional, por meio do uso de informações referentes ao posicionamento dos pontos de exposição no momento de aquisição das imagens, os quais podem ser obtidos por receptores GNSS acoplados às câmeras. Nessa conjuntura, o processo de SfM é executado com informações tridimensionais estimadas que auxiliam na formação da nuvem esparsa e, posteriormente, são usados os dados dos pontos de controle para melhor ajustar o

posicionamento do modelo em relação às coordenadas do sistema ao qual se deseja referenciar (VIANA et al. 2018).

3.3.6 REFINAMENTO DOS PARÂMETROS

Como forma de alcançar resultados mais precisos, após a efetivação do georreferenciamento, é opcional que os dados tridimensionais dos pontos inseridos e reconhecidos sejam usados para refinar ainda mais a restituição da geometria do modelo e dos parâmetros de orientação (internos e externos) da câmera, uma vez que se tornam uma nova fonte de informações a respeito dos erros na minimização da função de custo durante o processo de SfM. Assim, com esses dados adicionais, a etapa de geração da nuvem esparsa de pontos pode ser realizada novamente, otimizando o alinhamento das fotografias e reduzindo os erros de georreferenciamento e reprojeção da nuvem esparsa de pontos (SMITH; CARRIVICK; QUINCEY, 2016).

Essa otimização é importante nos casos em que se deseja utilizar o produto final (MDT) para mensurações, como é o caso para aplicações geodésicas. Isso se deve ao fato de que as características relativas à rotação, translação e escala das câmeras definidas anteriormente só se encontram aptas a corrigir erros lineares, ou seja, as deformações não lineares que podem ter sido originadas no processo de reconstrução geométrica permanecem mesmo após a inserção dos pontos de controle. Por isso, recomenda-se que esse refinamento seja executado com o intuito de garantir uma melhor precisão dos dados espaciais processados (AGISOFT, 2018; JAVERNICK; BRASINGTON; CARUSO, 2014).

3.3.7 DENSIFICAÇÃO DA NUVEM DE PONTOS

Embora o modelo resultante unicamente do processo de *Strucuture from Motion* possa ser usado para certas aplicações nas geociências, como o estudo da estrutura da vegetação e suas características espectrais realizado por Dandois e Ellis (2010), sem um processamento mais refinado, esses modelos de elevação do terreno normalmente possuem distorções devido à quantidade de ruídos e por não serem detalhados o suficiente para reconstruções tridimensionais de alta qualidade (ROSNELL; HONKAVAARA, 2012).

Nesse contexto, o objetivo dos algoritmos de *Multi-View Stereo* consiste em realizar a restituição mais precisa de uma superfície tridimensional por meio de imagens cujas localizações dos pontos de exposição são conhecidas. Assim, associado ao fluxograma de SfM, os dados referentes aos parâmetros das câmeras

reconstituídos na fase de solução da estrutura são inseridos como informação *a priori* para a resolução da configuração espacial completa das feições presentes nas imagens adquiridas, de modo que a nuvem de pontos inicialmente esparsa aumenta sua densidade em pelo menos dois graus de magnitude, além de reduzir os ruídos e aumentar significativamente a qualidade e o nível de detalhamento do MDT gerado (HARWIN; LUCIEER, 2012; QU; HUANG; ZHANG, 2018).

As diferentes formas de aplicar o MVS podem ser classificadas em quatro categorias: a primeira consiste em algoritmos que inicialmente computam uma função de custo em um volume tridimensional e então extraem deste a superfície analisada; a segunda opera desenvolvendo uma superfície de modo iterativo com o intuito de minimizar ou reduzir gradativamente uma função de custo; a terceira trabalha a partir do processamento de um conjunto de mapas de profundidade, com o cuidado de garantir que haja uma única interpretação consistente da cena; por fim, a quarta categoria é formada por algoritmos que a princípio extraem e associação um conjunto de feições para, em seguida, formar uma superfície que se encaixe nessas feições reconstruídas (SEITZ et al, 2006).

Essa técnica normalmente é usada como uma busca sistemática nos pixels de dados matriciais (*raster*) para reconhecer as melhores relações entre os pontos de imagens distintas. Desse modo, se a cena inteira é processada conjuntamente esse se torna um processo vagaroso e que exige grande desempenho computacional. Por esse motivo foram desenvolvidos algoritmos de MVS que apresentam a opção de organizar as fotografias em grupos ou ajustar a extensão da malha da imagem na qual serão executados, permitindo então que o tempo necessário para formar a nuvem de pontos densa e sua resolução sejam melhor gerenciados para cada contexto utilizado (BEMIS et al., 2014).

Nesse contexto, Furukawa et al. (2010) propõem um algoritmo denominado *Clustering View for Multi-view Stereo* (CMVS) que permite que esse agrupamento ocorra entre fotos que possuem pequenas faixas de sobreposição. Após essa etapa, o MVS é implementado para reconstruir a geometria tridimensional de cada subconjunto, os quais são posteriormente mesclados para formar uma única nuvem de pontos. Ademais, para garantir que haja consistência entre as diferentes qualidades de imagens trabalhadas provenientes das distâncias variadas pelas quais as cenas foram capturadas, o processamento passa por um filtro de erros com estimadores robustos que é computado de forma paralela e não concentrada em torno

de determinado ponto, facilitando sua implantação em grandes volumes de dados. Com essas propriedades, o algoritmo de CMVS foi capaz de trabalhar com milhares de imagens de áreas extensas, inclusive sendo o primeiro a ser utilizado para uma cidade inteira, Dubrovnik na Croácia.

Em complemento ao CMVS que decompõe a cena em grupos de imagens, o *Patch-based Multi-view Stereo* (PMVS2) é empregado para densificar a nuvem de pontos desses subconjuntos de forma independente. Esse algoritmo é implementado em três etapas: as feições identificadas e associadas entre várias imagens formam retângulos que são relacionadas a pontos proeminentes na imagem; as correspondências realizadas anteriormente são expandidas aos pixels próximos aumentando o número de retângulos; limitações na visibilidade são então usadas para eliminar associações que possam ter sido geradas na frente ou atrás da superfície de fato. Os últimos dois passos podem ser executados mais de uma vez, conforme a complexidade da reconstrução em cada situação (FURUKAWA; PONCE, 2007).

Desse modo, na etapa de densificação realizada no MVS, o conjunto dos algoritmos de CMVS e PMVS2 pode ser utilizado para reconstruir satisfatoriamente objetos (situações em que se deseja obter um único componente que é claramente visível em um grupo de fotografias capturadas em todo seu entorno), cenas (quando é necessário recompor tridimensionalmente uma área que pode apresentar setores ocultos e com pontos de vistas mais limitados) e cenas com interferências (em casos que existem obstáculos se movendo em frente ou sobre a superfície estática de interesse) (FURUKAWA; PONCE, 2007; FURUKAWA et al., 2010).

Portanto, ao contrário de outras técnicas de densificação que só suportam aplicações de tipos específicos de dados, essa metodologia é capaz de processar imagens para contextos genéricos e pode ser empregada em diversas atividades e, por esse motivo, é a mais usada dentro de aplicações com SfM-MVS em geral. Assim, através dos milhares de pontos de coordenadas definidas, a interpolação de seus dados é realizada para formar a superfície tridimensional do MDT (LUCIEER; JONG; TURNER, 2014; VASUKI et al., 2014; WESTOBY et al., 2012).

CAPÍTULO 04

CONTROLE DE QUALIDADE NA CARTOGRAFIA

A coleta de dados espaciais e a geração de produtos cartográficos são processos complexos por envolverem a utilização de vários tipos de metodologia e equipamentos, bem como de mão de obra especializada. Assim, para que seja possível verificar a qualidade desses produtos, existem procedimentos que analisam e classificam os resultados obtidos segundo alguns parâmetros principais: acurácia posicional e temática, que avaliam a proximidade dos valores representados com sua realidade; linhagem, a qual se refere às informações referentes aos dados espaciais utilizados; completude, que averigua a presença das feições essenciais para determinada representação; temporalidade, a qual estabelece os períodos em que devem ser realizadas atualizações; fidelidade semântica, que verifica se os símbolos usados são adequados para determinado atributo; consistência lógica, a qual verifica a compatibilidade de uma informação em relação ao conjunto de dados (NOGUEIRA JÚNIOR, 2003; ROCHA, 2002; THAPA; BOSSLER, 1992;).

Dentre esses vários parâmetros de avaliação, a exatidão posicional é um dos mais relevantes no processo classificatório da qualidade de produtos cartográficos destinados à mensuração, visto que os erros provenientes da aquisição de informações espaciais se propagam etapa por etapa, acumulando-se no final e podendo gerar discrepâncias consideráveis nas medições realizadas sobre o mapa com a realidade da superfície terrestre. Nesse sentido, é importante serem discutidos os conceitos de acurácia e precisão, bem como analisados os tipos de erros que podem estar presentes nas observações durante o levantamento de campo, visando detectá-los para serem minimizados ou corrigidos, quando possível (FERREIRA, 2014; NERO, 2005)

4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS ERROS

Segundo Veiga, Zanetti e Faggion (2012), todas as observações das grandezas medidas estão passíveis de erros independente dos cuidados durante o levantamento de dados, de modo que, mesmo se forem realizadas exatamente com as mesmas condições, as medidas não irão ser desprovidas de discrepâncias entre si, isto é, não serão todas idênticas. Por isso, a teoria dos erros subdivide as fontes desses erros em três classes: quando provenientes da falibilidade humana ou fatores anômalos

(erros grosseiros), devido ao uso de instrumentos descalibrados ou providos de imperfeições de fábrica (erros sistemáticos) e provenientes das condições ambientais (erros aleatórios ou acidentais), isto é, são inevitáveis.

Os erros grosseiros podem ser oriundos de leituras erradas nos equipamentos, da inversão de dígitos no momento de registrar nas cadernetas os valores medidos em campo ou da identificação de outro alvo por engano, geralmente sendo associados a descuidos dos profissionais ou de falhas nos instrumentos. Entretanto, mesmo quando as observações são registradas eletronicamente, como no caso da coleta de dados por receptores GNSS, os dígitos dos códigos transmitidos pelos satélites podem sofrer alterações devido a ruídos nas transmissões. Para evitar que esse tipo de erro esteja presente nas observações, é importante que o operador esteja atento no momento da aquisição dos dados, verificando as informações registradas, além da abundância de medições facilitar a posterior identificação da existência de valores discrepantes (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015; VEIGA; ZANETTI; FAGGION, 2012).

Já erros denominados de sistemáticos são aqueles que apresentam um padrão, de forma que a magnitude e sentido de suas manifestações podem ser determinadas ou modeladas modelagens matemáticas e/ou físicas. Desse modo, essas alterações nos valores das observações podem ser provenientes de falhas nos equipamentos utilizados, de sua não calibração adequada durante o levantamento de dados espaciais ou mesmo de efeitos presentes na natureza, como a refração e a curvatura da terra. Com o intuito de evitar que esses erros contaminem as medições, normalmente são utilizadas técnicas em campo para eliminá-los, a exemplo da utilização de leituras angulares conjugadas, na posição inversa e direta da luneta, e da implantação do nível a distâncias iguais dos pontos cujos desníveis devem ser definidos. Ademais, em casos que esses erros são detectados em escritório, muitas vezes podem ser eliminados por fórmulas específicas, quando conhecido seu comportamento (GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015; THAPA; BOSSLER, 1992).

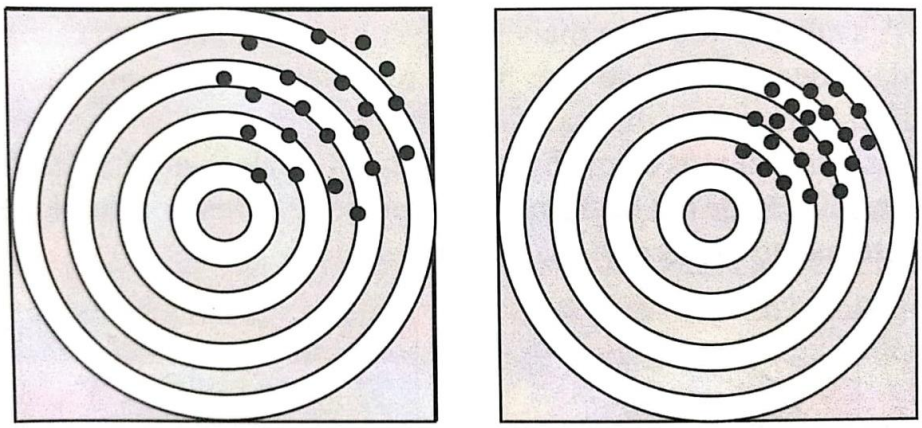
Por fim, mesmo se forem eliminados os erros sistemáticos e grosseiros, as medições ainda vão apresentar discrepâncias em relação as outras. Esse fenômeno ocorre devido à existência dos erros acidentais, que independem de qualquer tratamento realizado e que são intrínsecos a qualquer observação devido à própria incerteza associada ao processo de obtenção de dados espaciais. Tais erros são

também chamados de aleatórios por não se manifestarem seguindo uma magnitude ou sentido específico e sem que seja possível definir suas causas. Para minimizar os efeitos desses erros sobre as observações, são realizados tratamentos estatísticos, mais comumente o ajustamento pelo Método Mínimos Quadrados, uma vez que na abundância de dados, os erros aleatórios tendem a se comportar segundo a curva de distribuição normal de Gauss (KLEIN, 2011).

4.2 PRECISÃO E ACURÁCIA

Existem diversas discussões em literatura sobre a definição correta dos conceitos de acurácia e precisão. A descrição clássica do fenômeno de precisão está relacionada à dispersão dos dados levantados, de modo que quanto mais concentrados em torno de um valor mediano, isto é, quanto menor for o desvio padrão da distribuição, melhor será a precisão das amostras analisadas. Nesse sentido, são verificadas a existência de erros aleatórios, entretanto podendo existir conjuntos de dados considerados precisos, mas que não se concentram nas proximidades do valor verdadeiro, devido à presença de erros sistemáticos, como mostra a Figura 10, na qual a imagem esquerda representa um conjunto mais disperso e, portanto, menos preciso que a direita, contudo ambos se encontram distantes do alvo. Em outras palavras, a precisão está relacionada apenas ao grau de repetibilidade de observações sucessivas realizadas em condições similares (ambientais, temporais, instrumentais e operacionais) (ANTUNES; LINGNAU, 1997; GEMAEL; MACHADO; WANDRESEN, 2015).

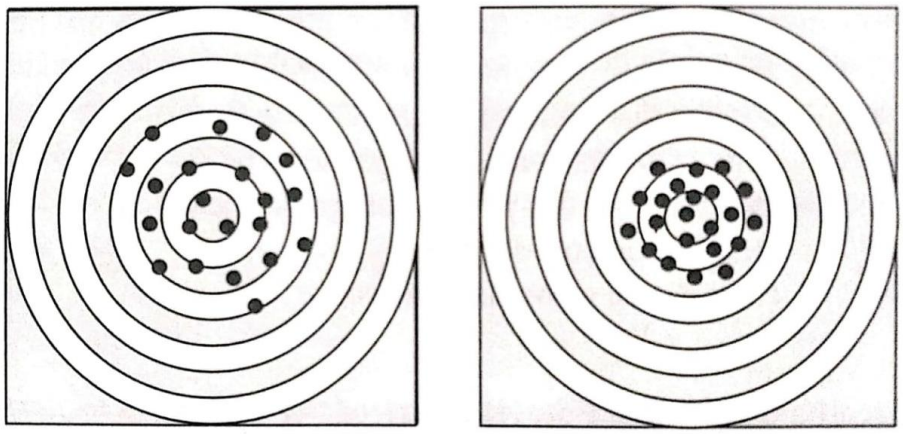
Figura 10 – Precisão da distribuição com erro sistemático.



Fonte: Andrade, 1998.

Quanto à acurácia, certos autores como Andrade (1998) e Mikhail e Ackermann, (1976) defendem que este conceito se trata apenas da análise da eliminação dos erros sistemáticos, sendo considerados igualmente exatos conjuntos de dados que se aproximam do valor real, independentemente de sua dispersão, como os apresentados na Figura 11. Entretanto, Monico et al. (2009) trazem uma ampla revisão das interpretações desses princípios no âmbito das observações e verificam que a análise da acurácia das observações inclui tanto a existência de tendência quanto o grau de repetibilidade. Nessa perspectiva, a Figura 11 mostra distribuições com nível de acurácia diferentes, sendo a imagem da direita mais exata que a da esquerda. Desse modo, torna-se dispensável o uso da expressão "análise da acurácia e da precisão posicional", visto que a primeira já se refere à verificação de erros sistemáticos e aleatórios.

Figura 11 – Exatidão da distribuição.



Fonte: Andrade, 1998.

4.3 PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA

A regulamentação do controle de qualidade posicional é estabelecida em diversos países através de normatizações específicas, visto que as a componente espacial é um dos dados considerado mais relevantes quando se trata da avaliação da qualidade de produtos cartográficos. Como exemplo dessas normas, podem ser citadas o *United States National Map Accuracy Standards* (NMAS) criada em 1947 nos Estados Unidos, a série 19.000 da ISO (Organização Internacional de Padronização), a *Australian Map and Spatial Horizontal Data Accuracy Standard* (AMSDAS) que vigora na Austrália, a Norma da ASPRS (*American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*) a qual é fundamentada na raiz do erro médio

quadrático (RSME), o Procedimento para os trabalhos de fiscalização da execução de ortofotomapas e cartografia digital desenvolvido pelo Instituto Geográfico Português e a Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) estabelecida no Brasil (FERREIRA, 2014). A Tabela 02 abaixo expressa uma comparação entre as regulamentações aplicadas em certos países.

Tabela 02 – Comparação entre normas de qualidade de produtos cartográficos.

País	Pontos de Controle	Indicador Estatístico	Nível de confiança	Avaliação Planimétrica	Erro Padrão
África do Sul	-	MMQ	95 %	Conjunta	0,26 e 0,36 mm
Austrália	20	RMSE	95 %	Separada	-
Brasil	-	PEC-PCD	90 %	Não fica Claro	Depende da escala
Japão	-	Desvio Padrão	-	Conjunta	-
México	-	Erro Circular Provável ou RMSE	50 e 95 %	Conjunta	0,3 ou 0,5 mm
Portugal	Calculados	RMSE	95 %	Conjunta	-

Fonte: Adaptada de Pereira e Nero (2012).

Em âmbito nacional, a primeira norma vigente que se referia à qualidade do produto cartográfico foi estabelecida pelo Decreto n° 89.817 de 20 de junho de 1984, o qual determinou o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) como sendo um indicador estatístico com intervalo de confiança de 90 %, correspondendo a 1,6449 do Erro Padrão (EP). Este último não pode ultrapassar 60,8 % do PEC, quando é determinado isoladamente em um produto cartográfico, além de ser considerado nessa norma como sinônimo de desvio padrão e erro médio quadrático. Desse modo, foram estabelecidas três classes de qualidade, A, B e C. Esses valores podem ser obtidos a partir do produto do erro padrão da classe pelo módulo da escala analisada, na planimetria, e pela equidistância vertical das curvas de nível, na altimetria, como é exposto na Tabela 03 (BRASIL, 1984).

Tabela 03 – Classificação da acurácia de cartas impressas.

Classe	Planimetria		Altimetria	
	PEC (mm)	EP (mm)	PEC (mm)	EP (mm)
A	0,5 x Escala	0,3 x Escala	1/2 x Eq. Vertical	1/3 x Eq. Vertical
B	0,8 x Escala	0,5 x Escala	3/5 x Eq. Vertical	2/5 x Eq. Vertical
C	1 x Escala	0,6 x Escala	3/4 x Eq. Vertical	1/2 x Eq. Vertical

Fonte: Adaptada de Brasil (1984).

Posteriormente, com o intuito de atualizar os parâmetros de avaliação da acurácia posicional considerando o advento da utilização de produtos digitas, a Comissão Nacional de Cartografia (CONCAR) publicou em 2011 a Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV), que estabeleceu o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). Essas novas diretrizes mantêm o padrão de 90% de probabilidade para o indicador estatístico da dispersão, mas acrescentam uma nova classificação, mais rigorosa, no PEC proposto em 1984 para mapas impressos, que passou a ser a classe A, e as demais desceram uma categoria. Desse modo, para que um produto digital seja aceito como referência nos bancos de dados do Sistema Cartográfico Nacional e da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais seu desvio padrão deve ser igual ou inferior ao disposto nessa norma. Os valores planimétricos e altimétricos para os modelos digitais (de elevação, de superfície e do terreno) e pontos cotados do PEC e do EP são expostos nas Tabelas 04.

Tabela 04 – Classificação da acurácia de produtos digitais.

Classe PEC	Classe PEC-PCD	Planimetria		Altimetria	
		PEC (mm)	EP (mm)	PEC (mm)	EP (mm)
-	A	0,28 X Escala	0,17 x Escala	0,27 x Eq. Vertical	1/6 x Eq. Vertical
A	B	0,5 x Escala	0,3 x Escala	1/2 x Eq. Vertical	1/3 x Eq. Vertical
B	C	0,8 x Escala	0,5 x Escala	3/5 x Eq. Vertical	2/5 x Eq. Vertical
C	D	1 x Escala	0,6 x Escala	3/4 x Eq. Vertical	1/2 x Eq. Vertical

Fonte: Adaptada de CONCAR (2011).

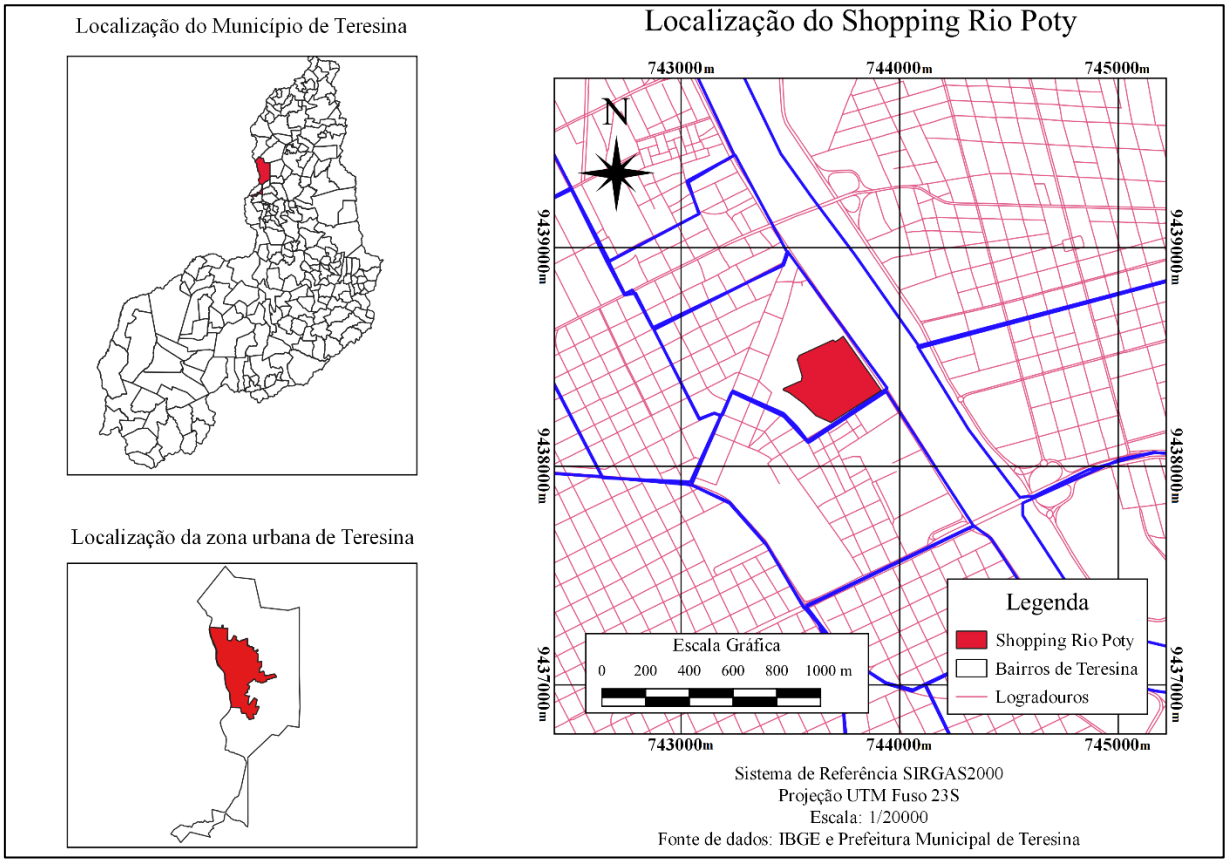
CAPÍTULO 05

METODOLOGIA

5.1 ÁREA DE ESTUDO

A referente pesquisa foi realizada na cidade de Teresina, capital do estado do Piauí e as imagens utilizadas foram capturadas em um talude presente no estacionamento do *Shopping* Rio Poty, localizado no bairro Porenquanto, na Avenida Marechal Castelo Branco, às margens do Rio Poty, zona urbana Norte do município. A Figura 12 traz o mapa de localização em âmbito estadual e municipal, bem como a identificação dos bairros nos arredores do estabelecimento.

Figura 12 – Mapa de localização.



Fonte: Autora (2019).

5.2 MATERIAIS

Para a obtenção das imagens, foi utilizada a câmara digital *reflex* de objetiva simples (*Digital Single Lens Reflex* – DLSR) NIKON modelo D7000 (Figura 13) com sensor CMOS (*Complementary Metal-Oxide Semiconductor*) de 23,6x15,6 mm e

tamanho da imagem 4928x3264 *pixels*. A lente usada foi a AF-S DX NIKKOR 18–105 mm f/3.5-5.6G ED VR, com a distância focal sendo fixada em 18mm para a captura das fotografias analisadas no referente trabalho (NIKON CORPORATION, 2010).

Figura 13 – Câmera Nikon Modelo D7000.

Fonte: Autora (2019).

A plataforma escolhida para acoplar a câmera foi o tripé telescópico (Figura 14), por ser um dos principais instrumentos usados na fotogrametria terrestre, com o intuito de garantir a estabilidade do sensor no momento da aquisição das cenas, diminuindo o arrastamento presente nas imagens, além de permitir a calibração da posição vertical e horizontal da câmera, caso desejado, devido à presença de nível tubular.

Figura 14 – Tripé telescópico.

Fonte: Autora (2019)

Para o apoio de campo e levantamento da posição relativa dos pontos foi utilizada a estação total Ruide RTS-822R3 n° 078775, Patrimônio da Universidade Federal do Piauí (UFPI) n° 195374, de precisão posicional de (2+2ppm) mm e angular de 2”, nível tubular de 30”/2 mm e sistema de medida por laser vermelho visível (Classe II sem prisma) com frequência básica de 60MHz.

Figura 15 – Estação Total.

Fonte: Autora (2019).

Ademais, também foram usados tripés de madeira para fixar a estação total e o prisma, trena para medir a altura dos equipamentos e nortear a distância entre pontos de exposição consecutivos no momento de captura das fotos, bem como uma *umbrella* para proteger os instrumentos do contato direto com raios solares.

5.3 PROCEDIMENTOS DE CAMPO

Inicialmente, foram implantados nove pontos artificiais no terreno a ser levantado, com centroides definidos a partir de cruzamentos entre duas linhas de 1 cm de espessura e 10 cm de comprimento, na cor preta sobre fundo branco para que

fosse possível diferenciar facilmente das feições da superfície natural, como apresentado no detalhe da Figura 16 .

Figura 16 – Ponto de controle utilizado.

Fonte: Autora (2019).

Esses marcos foram dispostos de modo a cobrir toda a extensão a ser imageada, conforme demonstrado na Figura 17, com o intuito de permitir que o modelo tridimensional fosse submetido à escala e referenciado adequadamente, bem como posteriores análises comparativas de precisão.

Figura 17 – Disposição dos pontos de controle no terreno.

Fonte: Autora (2019).

Posteriormente, foram escolhidos dois pontos (materializados com tinta no solo) para formar a linha de base do levantamento topográfico. O primeiro (P_A) foi utilizado como origem do sistema local de coordenadas planas, arbitrariamente

atribuído como X: 100m, Y: 100m, Z: 100m para certificar que não existiriam pontos com coordenadas negativas e o segundo (P_B) para referenciar a estação total por ângulo e distância, como sendo o Norte (azimute 0°0’0”).

Assim, inicialmente o aparelho foi devidamente estacionado e calado sobre o P_A, sendo medida sua altura e introduzidas as informações de posição dos pontos e de altura do prisma verticalizado no P_B. Com a posição direta (PD) foi visada a parte inferior do bastão, posicionando e fixando horizontalmente o fio médio da luneta no ponto marcado e, então, elevando-o para o prisma onde a medição de distância é realizada (sendo descontados os 35 mm referentes à constante do prisma).

Após o referenciamento do instrumento, foram realizadas duas séries de observações com pares conjugados (posição direta e inversa da luneta) no P_B para posterior ajustamento da linha de base. Em seguida, foram determinadas as coordenadas dos pontos de controle dispostos sobre o terreno, através da observação em cada ponto também com duas séries em PD e PI, visando garantir a redução de erros sistemáticos na posição dos pontos (Figura 18).

Posteriormente, a estação total foi posicionada no P_B e referenciada por coordenadas (já determinada na etapa anterior) em relação ao P_A. De forma análoga, foram medidos os nove pontos, totalizando 4 séries de pares conjugados por ponto de controle, devidamente registradas em um cartão de memória inserido no aparelho para otimizar o tempo de levantamento.

Figura 18 – Estação total na linha de base visando os pontos de controle.

Fonte: Autora (2019).

Com a conclusão do levantamento topográfico, foi dado início à aquisição das fotografias (Figura 19). Foram estabelecidas três faixas para a determinação dos pontos de exposição, distando da base do talude em cerca de 30, 20 e 15 metros respectivamente. Ainda, para garantir uma cobertura uniforme da superfície, a câmera foi posicionada com distâncias relativamente equivalentes em imagens consecutivas, tendo sido planejado inicialmente a captura de 11 fotos/faixa.

Figura 19 – Aquisição das fotografias

Fonte: Autora (2019)

Entretanto, ao final desses procedimentos foram capturadas mais imagens, principalmente nas regiões das extremidades das faixas, como intuito de assegurar uma densidade adequada destas na porção do terreno escolhida para realizar o referente estudo. Desse modo, foram ao todo obtidas 53 cenas, por fim descartadas aquelas que apresentaram menor qualidade (em casos de fotografias adquiridas praticamente na mesma posição) e objetos em movimento (como carros, pessoas, etc.), totalizando 47 fotos utilizadas para a confecção do MDT. A Figura 20 apresenta o exemplo de uma das fotografias (projeção bidimensional em perspectiva) escolhidas e inseridas como dados brutos no *Agisoft Photoscan*.

Figura 20 – Fotografia do terreno adquirida em campo.

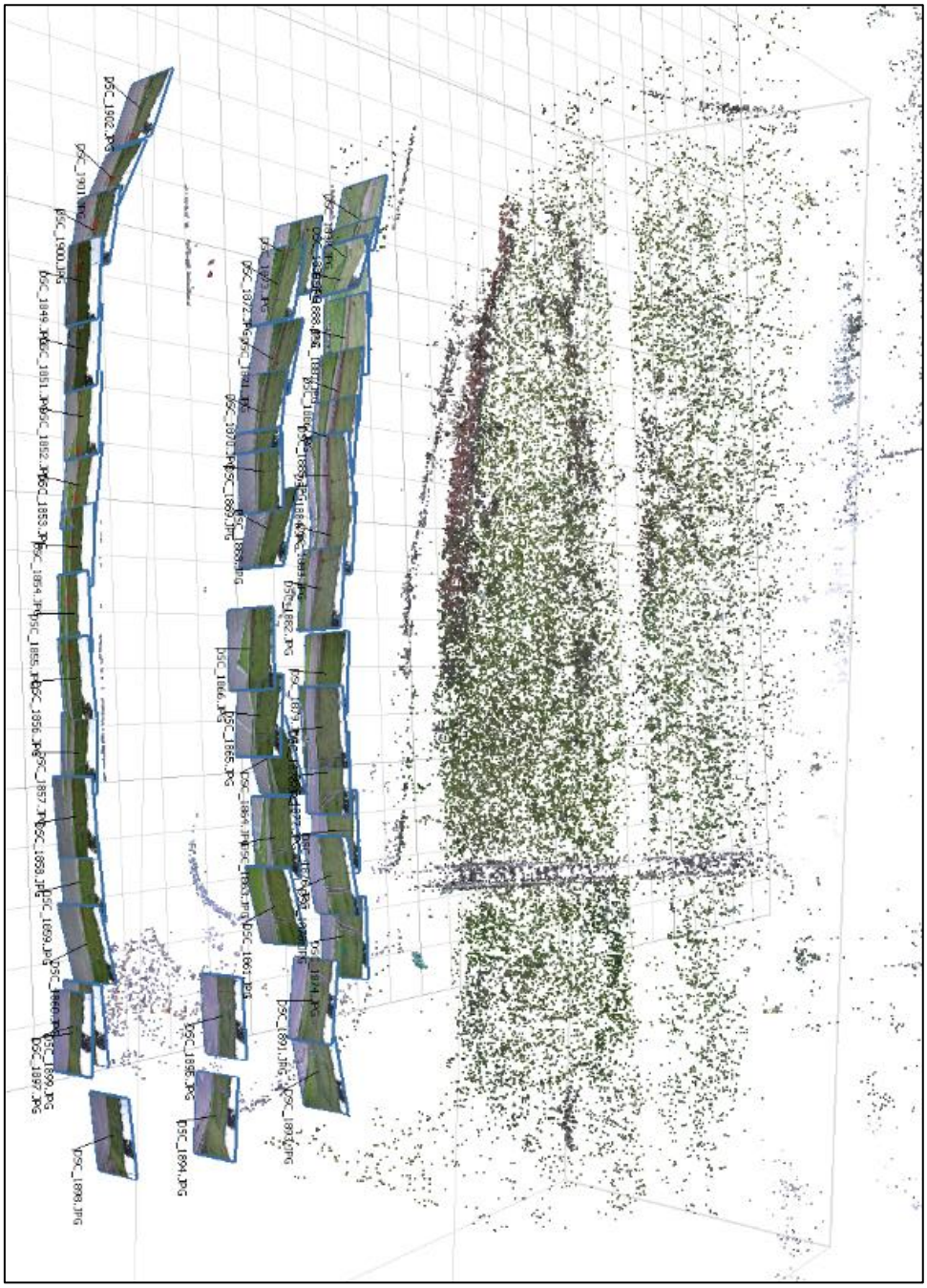
Fonte: Autora (2019).

5.4 PROCESSAMENTO

Dentre as várias metodologias disponíveis para a realização do processamento das fotografias obtidas por algoritmos de SfM-MVS, foi utilizado o *software* comercial Agisoft Photoscan 1.4, versão gratuita de teste por 30 dias, para a execução da referente pesquisa, tendo em vista a facilidade de trabalhar com sua interface e por permitir a realização de todas as etapas do processamento (conforme tópico 3.3) em um único programa.

Inicialmente as imagens são inseridas no *Photoscan* e são selecionadas para estimar sua qualidade. Considerando que todas apresentam qualidade acima de 0,6 *pixels* pode-se iniciar o reconhecimento e correspondência de feições para que sejam solucionados a estrutura tridimensional da superfície, gerando uma nuvem esparsa de pontos, e determinando a posição dos pontos de exposição, por meio da estimação dos parâmetros de rotação e translação da câmera (Figura 21).

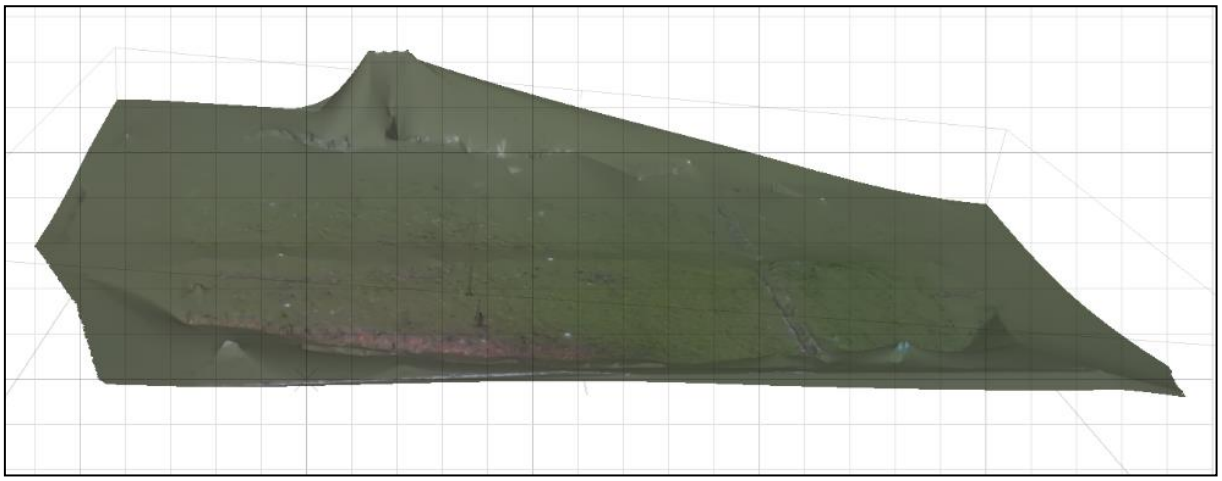
Figura 21 – Posições estimadas da câmera no momento das exposições.



Fonte: Autora (2019).

Em seguida, para que ao modelo seja submetido à escala e referenciado ao sistema local de coordenadas planas, os pontos de controle são marcados nas imagens. Com o intuito de otimizar esse procedimento, recomenda-se que a nuvem esparsa de pontos seja interpolada formando um MDT simplificado (Figura 22), para que o *software* possa filtrar em quais fotografias essa porção da área está presente (Figura 23), possibilitando que os marcos sejam aplicados (quando são visíveis nas imagens) ou removidos (quando algum objeto oculta o ponto de apoio).

Figura 22 – MDT gerado pela interpolação da nuvem esparsa de pontos.



Fonte: Autora (2019).

Figura 23 – Fotografias que apresentam o ponto de controle P1.

Fonte: Autora (2019).

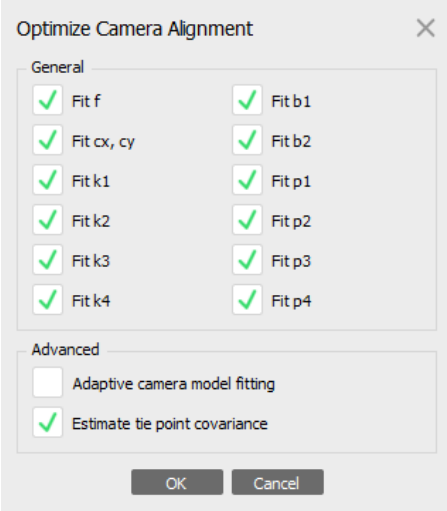
Esse procedimento é então realizado para os nove pontos (cinco de controle e quatro de verificação) distribuídos no local, nomeados P1 à P9, conforme Figura 24. Posteriormente, são inseridos no programa as coordenadas dos marcos obtidas por meio da média das quatro séries de observações conjugadas executadas com a estação total, de modo que seja possível referenciar a nuvem esparsa de pontos com seis pontos a mais que o mínimo exigido (três) e adequar sua escala através das distâncias calculadas entre suas coordenadas.

Figura 24 – Identificação dos pontos *software.*

Fonte: Autora (2019).

Posteriormente, foi utilizada a função presente no *Photoscan* para o ajustamento dos coeficientes de calibração interna da câmera (distância focal, distorções radial e tangencial). Assim, todos os parâmetros foram selecionados para serem refinados de acordo com a transformação otimizada presente no programa (Figura 25), visando minimizar os erros não lineares presentes no modelo gerado, melhorando a qualidade dos dados e a precisão dos resultados.

Figura 25 – Refinamento dos parâmetros internos da câmera.



Fonte: Autora (2019).

A partir da nuvem de pontos esparsa devidamente georreferenciada, foram executados os algoritmos de *Multi-View Stereo* para realizar a densificação dos pontos com base nas coordenadas estimadas das posições nas quais foram adquiridas as

fotografias. Esse processo aumentou consideravelmente as feições representadas (Figura 26), permitindo que o terreno fosse, então, caracterizado de forma mais fiel e com maior nível de detalhamento.

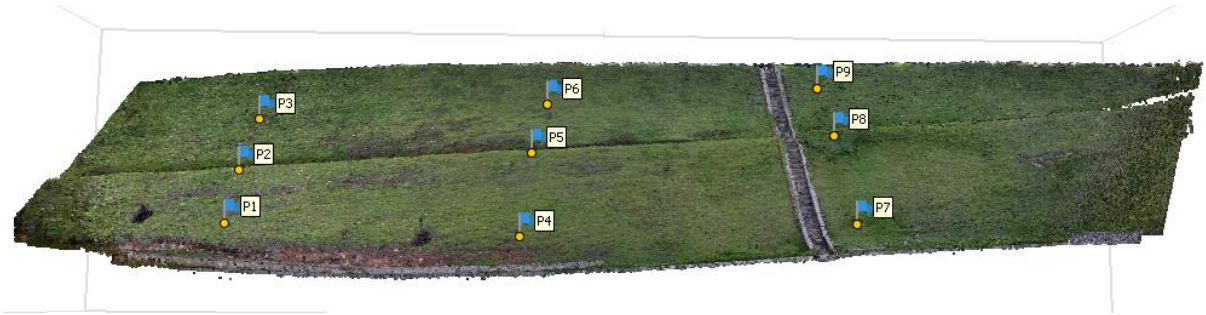
Figura 26 – Nuvem de pontos densificada.

Fonte: Autora (2019).

É importante ressaltar que para a realização dessa etapa foram utilizadas as qualidades originais das imagens, isto é, o parâmetro da qualidade da densificação (Ultra-alta) foi escolhido de modo a não realizar o redimensionamento das fotografias e possibilitar a geração de mais pontos, contudo exigindo maior tempo de processamento.

Por fim, a nuvem de pontos foi classificada automaticamente para a diferenciação entre os pontos presentes na superfície do terreno e outros que estivessem acima (postes de iluminação e grades), para que estes últimos não fossem utilizados na modelagem da área (Figura 27). Além disso, a delimitação dessa parcela foi realizada para eliminar pontos que não sejam de interesse, visando diminuir o desempenho computacional exigido.

Figura 27 – Área de interesse delimitada.



Fonte: Autora (2019).

Desse modo, a partir da nuvem de pontos gerada é possível realizar diversos estudos do relevo da região, executar interpolações para modelos tridimensionais, comparar com outras metodologias ou mesmo exportá-la para ser trabalhada em outros *softwares*, conforme a finalidade do estudo.

É importante ressaltar que para esse trabalho foi utilizado uma estação fotogramétrica digital com placa de vídeo NVIDIA, processador i7-4770, CPU 3,40GHz, 8GB de RAM, Sistema Operacional de 64bits, o que reduziu consideravelmente o tempo de processamento em relação a outras máquinas. Entretanto, ainda sim o desempenho computacional requerido devido à alta qualidade das imagens utilizadas e das configurações utilizadas para a reconstrução tridimensional com o maior nível de detalhamento possível tornou esse processo mais lento, principalmente na densificação da nuvem de pontos que, como pode ser verificado no Apêndice A, durou cerca de 2 dias (incluindo a geração de mapas de profundidade realizada previamente neste mesmo algoritmo).

5.5 AVALIAÇÃO DA PRECISÃO POSICIONAL

Com o intuito de verificar as precisões posicionais resultantes dos modelos digitais formados a partir das técnicas de SfM-MVS, as informações tridimensionais dos nove pontos de controle estabelecidos, obtidas com a estação total, foram consideradas como verdade de campo. Assim, para analisar a discrepância entre esses resultados existem diversos parâmetros métricos que podem ser utilizados, sendo escolhido para o referente trabalho a Raiz do Erro Quadrático Médio (*Root Mean Squared Error* - RMSE em inglês), visto que é amplamente utilizado e reconhecido no meio científico, além de ser uma representação relativamente simples de ser compreendida quando está sendo comparado um conjunto de pontos distribuídos em vez de superfícies contínuas (HARWIN; LUCIEER, 2012). Nesse sentido, temos a fórmula geral do RMSE aplicada a determinada observação, conforme a Equação 1.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{a}_i - a_i)^2}{n}} \qquad (1)$$

Onde n é o número de medições, $\hat{a}_i$ o valor estimado pelo modelo gerado a partir do SfM-MVS e a_i o valor observado em campo com a estação total. Desse modo,

o RSME foi determinado para as coordenadas individualmente ($RMSE_X$,$RMSE_Y$, $RMSE_Z$), para os resultados planimétricos ($RMSE_{XY}$) ,conforme a Equação 2, e para o erro tridimensional total ($RMSE_{XYZ}$), como mostra a Equação 3.

$$RMSE_{XY} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{x}_i - x_i)^2 + (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \tag{2}$$

$$RMSE_{XYZ} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{x}_i - x_i)^2 + (\hat{y}_i - y_i)^2 + (\hat{z}_i - z_i)^2}{n}} \tag{3}$$

5.6 AVALIAÇÃO DE TENDÊNCIA

Para que fosse possível analisar a existência de erros sistemáticos nos dados espaciais extraídos dos modelos gerados no *Agisfot Photoscan*, as coordenadas dos quatro pontos de verificação provenientes da média das medições em todas as projeções em que os marcos estavam visíveis (X_i^E) foram comparadas com suas coordenadas de referência determinada em campo pela estação total (X_i^R). Nesse sentido, são calculadas as discrepâncias encontradas nas coordenadas X (ΔX), Y (ΔY) e Z (ΔZ) para cada ponto, conforme a Equação 4:

$$\Delta X_i = X_i^E - X_i^R \tag{4}$$

Assim, a média $\overline{\Delta X}$ e o desvio padrão $S_{\Delta X}$ da diferença entre as coordenadas podem ser obtidos, respectivamente, pelas Equações 5 e 6:

$$\overline{\Delta X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta X_i}{n} \tag{5}$$

$$S_{\Delta X} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta X_i - \Delta X)^2}{n-1}} \tag{6}$$

Com o intuito de verificar a tendência dos dados, foi escolhida a distribuição unilateral *t de Student* (mais indicada para conjunto de dados com poucas amostras)

para realizar o teste de hipótese com 90% (1-∝) de confiança, considerando na hipótese nula (H_0) a não existência de erros sistemáticos e na hipótese alternativa (H_1) a presença de tendência. Desse modo, a estatística amostral "t_x" foi obtida (Equação 7) e, em seguida, verificada se pertencia ao intervalo de confiança (Equação 8) considerado para o grau de liberdade ($n - 1$) que admite a hipótese nula como válida.

$$t_x = \frac{\Delta X}{S_{\Delta X}}\sqrt{n} \tag{7}$$

$$|t_x| < t_{(n-1,\propto)} \tag{8}$$

Uma vez que análise é realizada, se o módulo do t calculado for inferior ao tabelado (Anexo A), considera-se que a amostra não apresenta erros sistemáticos. Contudo, caso esse valor seja superior, indicando a existência de tendência na distribuição, que é representada pela média das discrepâncias, Galo e Camargo (1994) recomendam que esse valor seja subtraído da coordenada de cada ponto para reduzir seu efeito na obtenção dos dados.

5.7 AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO CARTOGRÁFICA

Com a finalidade de verificar a acurácia dos produtos cartográficos obtidos, foi realizada a análise da exatidão dos dados coletados em relação ao Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). Para isso, foi comparado o desvio padrão das discrepâncias com o erro padrão (EP) das escalas estabelecidas, conforme suas classes, tanto para os resultados planimétricos, como altimétricos.

Dessa forma, o teste de hipóteses definido através do qui-quadrado infere na hipótese nula que a variância das discrepâncias amostrais ($S_{\Delta X}^2$) é estatisticamente igual à variância do erro padrão (σ_X^2), considerando o nível de 90% de confiança, enquanto a hipótese alternativa trabalha com a possibilidade de $S_{\Delta X}^2$ e σ_X^2 serem diferentes. Como o EP é determinado para a resultante planimétrica e não para uma coordenada, o desvio padrão para uma componente (coordenada) pode ser obtida pela Equação 9. Já para a altimetria, o EP se mantém como sendo igual ao seu desvio padrão.

$$\sigma_x = \frac{EP}{\sqrt{2}} \tag{9}$$

Assim, o valor do qui-quadrado (χ_X^2) deve ser calculado segundo a Equação 10 e, posteriormente, comparado com o valor tabelado (Equação 11) conforme o grau de liberdade ($n - 1$) e o intervalo de significância ($\propto$) da distribuição.

$$\chi_X^2 = \frac{S_{\Delta X}^2}{\sigma_X^2} * (n - 1) \tag{10}$$

$$\chi_X^2 \leq \chi_{(n-1,\propto)}^2 \tag{11}$$

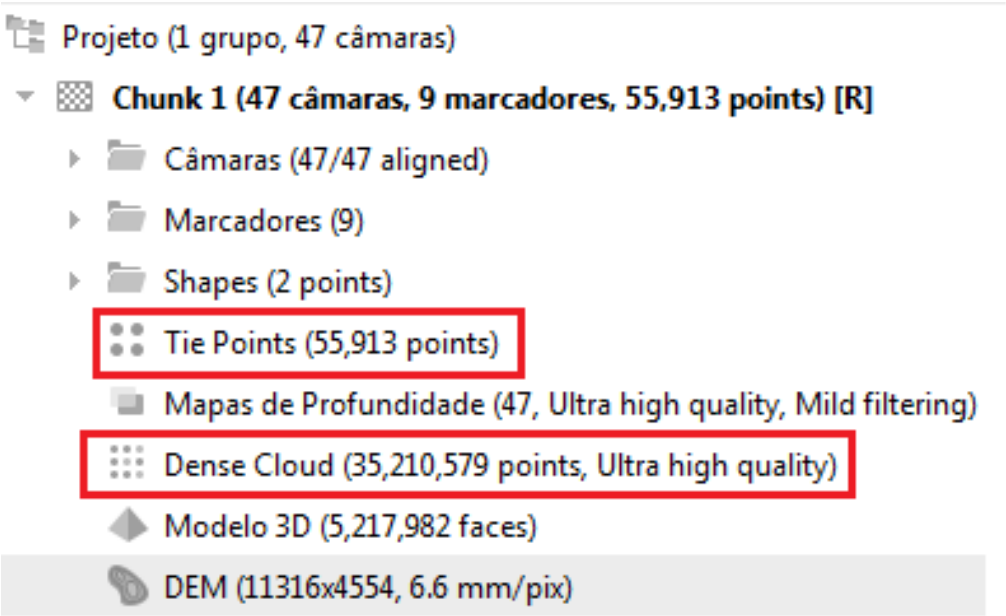
Posteriormente, essa estatística de teste é calculada também para as coordenadas Y e Z. Se o valor de χ^2 for inferior ao valor tabelado (Anexo B), a hipótese nula é aceita, significando que a o produto cartográfico atende à precisão analisada. Caso seja superior, não atende aos padrões da classe referida.

CAPÍTULO 06

RESULTADOS

A quantidade de pontos com coordenadas conhecidas originado com a aplicação dos algoritmos de *Structure from Motion,* isto é, a restituição inicial do terreno pela nuvem esparsa, possibilitou a criação de 55.913 pontos. Com a densificação pelo uso da técnica *Mult-View Stereo* e delimitação conforme a área de estudo, a quantidade de pontos passou a ser de mais de 35 milhões de pontos, como mostra a Figura 28.

Figura 28 – Modelo digital do terreno.



Fonte: Autora (2019).

Desse modo, com o intuito de apresentar os valores obtidos através da nuvem de pontos densificada, foi realizada a interpolação das coordenadas para a geração do modelo digital do terreno (MDT), representando tridimensionalmente a superfície imageada. Assim, também foram aplicadas as texturas (extraída das fotografias) sobre o MDT, as quais permitem a melhor visualização dos detalhes e padrões presentes na região retratada, conforme a representação na Figura 29.

Figura 29 – Textura aplicada no MDT.

Fonte: Autora (2019).

Além disso, o processamento do modelo de elevação digital (DEM) foi executado por ser um produto que permitem a realização de medições de coordenadas dos pontos, distâncias, áreas e volumes, bem como a geração de dados vetoriais como curvas de níveis. Nesse sentido, por se tratar de uma projeção plana, é possível determinar em relação a quais eixos esse modelo seria gerado, utilizando-se comumente o plano paralelo às fotografias. Entretanto, para o terreno analisado, por se tratar de um talude com inclinação considerável, também foi possível formar um modelo consistente a partir do plano ortogonal às imagens.

Assim, para o MDE originados do plano YZ, as curvas de nível se referem às coordenadas X, permitindo perceber a noção de profundidade das feições da área de interesse, sendo os modelos normalmente provenientes da fotogrametria terrestre. Já referente ao plano XY, os modelos digitais gerados apresentam a visão em planta do terreno, com as curvas de nível relativa à altura dos pontos (coordenada Z). Essa representação costuma ser produto do processamento de imagens aéreas, contudo sendo possível extrair das fotografias utilizadas no referente trabalho.

Por fim, as fotografias foram corrigidas geometricamente para a formação de ortofotos e são unidas no ortomosaico, que foi editado para eliminar objetos como postes de iluminação, placas de sinalização e hidrante que, em algumas imagens, encontravam-se sobrepostos à superfície do terreno, sendo então selecionadas as regiões nas quais essas interferências estavam presentes e ajustadas de modo subjetivo, conforme a escolha de fotos das mesmas áreas e que não apresentavam tais objetos.

6.1 AVALIAÇÃO DA PRECISÃO POSICIONAL

As coordenadas dos pontos de controle foram determinadas através da topografia clássica, com o uso da estação total, coletadas a partir de dois pontos distintos que, formando uma linha de base, totalizaram quatro séries de leituras conjugadas (oito observações) em cada ponto. Dessa forma, a Tabela 05 apresenta a média dessas coordenadas, as quais foram estabelecidas como verdade de campo para referenciar o modelo gerado por SfM-MVS e verificar sua precisão posicional.

Tabela 05 – Coordenadas dos pontos de controle.

Ponto	**Coordenadas da Estação Total**		
	X (m)	Y (m)	Z (m)
P1	75,156	70,869	103,902
P2	71,178	70,707	107,024
P3	65,009	70,547	110,523
P4	77,698	87,461	101,992
P5	71,450	88,083	106,789
P6	65,550	89,043	110,154
P7	77,644	105,787	101,399
P8	71,504	106,069	106,580
P9	65,019	106,462	110,039

Fonte: Autora (2019).

A partir dos modelos gerados no *software Agisoft Photoscan* versão 1.4 foram realizadas as comparações com os valores observados em campo, em relação à precisão posicional dos cinco pontos de controle distribuídos na área de interesse, resultando na Tabela 6, e dos quatro pontos de verificação presentes na Tabela 07, indicando RMSE determinado para cada coordenada e tridimensional (total).

Tabela 06 – Raiz do erro quadrático médio dos pontos de controle.

Ponto	**ΔX (cm)**	**ΔY (cm)**	**ΔZ (cm)**	**Total (cm)**
P1	0,798	0,315	-0,521	1,004
P3	-0,664	1,014	0,334	1,258
P5	-1,560	-0,200	1,233	1,999
P7	2,467	1,611	-1,898	3,505
P9	-1,046	-2,741	0,859	3,057
RMSE	**1,462**	**1,502**	**1,118**	**2,376**

Fonte: Autora (2019).

Tabela 07 – Raiz do erro quadrático médio dos pontos de verificação.

Point	ΔX (cm)	ΔY (cm)	ΔZ (cm)	Total (cm)
P2	-0,573	0,506	0,559	0,947
P4	3,023	0,026	-1,317	3,297
P6	-0,129	-0,818	0,869	1,200
P8	-0,440	-0,477	1,170	1,337
RMSE	**1,555**	**0,537**	**1,021**	**1,936**

Fonte: Autora (2019).

Analisando esses valores, é possível perceber que a maioria dos pontos se apresentam com discrepâncias inferiores a 1 cm. Entretanto, ao contrário do esperado, o erro total na coordenada Z nos pontos de controle é inferior às demais. Considerando as discrepâncias tridimensionais, é possível perceber que o Ponto 7 e o Ponto 9 são destacados com valores acima de 3 cm. Uma provável explicação para esse fenômeno pode ser o fato de que, apesar de aparecerem visíveis em um número considerável de imagens, os pontos presentes nesse lado do talude se encontram nas extremidades inferiores ou superiores de várias dessas fotos, portanto, estando mais sujeitos às distorções inerentes às projeções bidimensionais e à lente da câmera.

Para os pontos de verificação, o menor erro se encontra na componente Y, com magnitude de cerca de 5mm. Já no RMSE tridimensional, o valor do Ponto 4 foi significativamente superior aos demais (cerca de 3x maior), devido à propagação do erro de sua coordenada X. Por ser um ponto mais centralizado, este esteve presente em várias imagens, ou seja, era esperado que sua estimação fosse mais precisa que os outros. Esse fator pode ter sido causado, então devido às imagens na faixa mais próxima permitem que o centroide do ponto fosse representado por mais de um pixel (a distância para o centro de perspectiva da câmera é menor para os pontos localizados próximo à base do talude, o que aumenta a escala de sua representação), podendo causar maiores discrepâncias entre as observações das coordenadas no sistema imagem realizadas manualmente no *Photoscan*.

Já no referente à precisão geral do levantamento, considerando a verdade de campo como os valores provenientes da estação total, os erros tridimensionais de 2,4cm e 1,9cm, para os pontos de apoio e verificação respectivamente, correspondem ao esperado para essa metodologia, uma vez que a distância média entre o terreno fotografado e os pontos de exposição foi de 26,6 metros (conforme o relatório de processamento no Apêndice D), corroborando com resultados encontrados em

literatura para estudos semelhantes e ratificando a precisão proposta por James e Robson (2012) de 1:1000.

Entre outras coisas, a superposição das imagens uniforme e consideravelmente grande em todo terreno estudado contribui para que fossem encontrados tais valores. Essa preocupação no momento da aquisição das cenas no campo foi reforçada com a captura de mais fotos nas extremidades do terreno ao final da execução das faixas planejadas, para garantir que nenhuma parcela da área de interesse fosse representada por poucas cenas.

6.2 AVALIAÇÃO DE TENDÊNCIA

Com o intuito de analisar a existência de erros sistemáticos nas observações, foram determinadas as coordenadas planialtimétricas estimadas no *Agisoft* (após a identificação dos marcos em todas imagens nas quais se encontravam visíveis) e as levantadas com a estação total em campo, como mostra a Tabela 08.

Tabela 08 – Coordenadas estimadas e observadas.

Ponto	Coordenadas Estimadas no Agisoft			Coordenadas da Estação Total		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
P2	71,172	70,712	107,029	71,178	70,707	107,024
P4	77,728	87,461	101,979	77,698	87,461	101,992
P6	65,549	89,035	110,162	65,550	89,043	110,154
P8	71,500	106,065	106,591	71,504	106,069	106,580

Fonte: Autora (2019).

Em seguida, as diferenças entre essas coordenadas (Tabela 9) são obtidas pela Equação 4, substituindo a variável por cada coordenada (X, Y e Z), bem como suas médias a partir da Equação 5 e respectivos desvios padrões da Equação 6.

Tabela 09 – Discrepâncias entre as coordenadas estimadas e observadas.

Pontos	Discrepância		
	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)
P2	-0,006	0,005	0,005
P4	0,030	0,000	-0,013
P6	-0,001	-0,008	0,008
P8	-0,004	-0,004	0,011
Média	**0,005**	**-0,002**	**0,003**
Desvio Padrão	**0,017**	**0,006**	**0,011**

Fonte: Autora (2019).

Para verificar a presença de tendência na distribuição de dados analisada, o parâmetro de *t de Student* foi calculado como mostra a Equação 7 e coletado na tabela

(Anexo A) segundo o grau de liberdade 3 (4 pontos de verificação -1) e nível de significância 0,01 (10%). A comparação entre esses valores é apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 – Avaliação de tendência.

Coordenada	$\lvert t_{calc} \rvert$	$t_{8;0,01}$	Análise
X	0,573	2,353	Sem tendência
Y	0,612	2,353	Sem tendência
Z	0,549	2,353	Sem tendência

Fonte: Autora (2019).

Conforme os resultados expostos acima, é possível perceber que os módulos da variável t obtidos para as três componentes planialtimétricas dos pontos se encontram abaixo do valor tabelado, isto é, a hipótese nula de que não existem erros sistemáticos nessas coordenadas é aceita e os dados analisados não possuem tendência.

6.3 AVALIAÇÃO DA EXATIDÃO CARTOGRÁFICA

Após o conjunto de coordenadas ter passado na avaliação de tendência, é realizado o processo de avaliação da exatidão dos dados através do teste referente ao qui-quadrado. Desse modo, considerando a hipótese nula de que a variância da amostra é menor que a variância do erro padrão estabelecido na Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) pela CONCAR (2011), são analisadas as classes de acordo com um intervalo de confiança de 90 % (ou seja, 10 % de nível de significância) e com grau de liberdade 3, devido à existência da observação de quatro pontos de verificação ($n - 1$).

É importante ressaltar que as escalas escolhidas para a análise da exatidão cartográfica foram escalas grandes, uma vez que as imagens adquiridas no referente trabalho foram coletadas distantes apenas dezenas de metros da área de estudo, gerando produtos cartográficos digitais com grande nível de detalhamento e de uma área pequena em extensão territorial. O erro padrão planimétrico, em metros, é então calculado a partir do produto entre o parâmetro EP, em milímetros, apresentado no ET-ADGV e o módulo das respectivas escalas, determinado na Tabela 11 conforme cada classe.

Tabela 11 – Erro padrão planimétrico.

Classe	Escala						
	1/50	1/75	1/100	1/250	1/500	1/750	1/1000
A	0,009	0,013	0,017	0,043	0,085	0,128	0,170
B	0,015	0,023	0,030	0,075	0,150	0,225	0,300
C	0,025	0,038	0,050	0,125	0,250	0,375	0,500
D	0,030	0,045	0,060	0,150	0,300	0,450	0,600

Fonte: Autora (2019).

Posteriormente, os desvios dos erros padrões para uma componente das coordenadas planimétricas são obtidos através da Equação 9. Sendo assim, a variância desses fatores é determinada como sendo o quadrado dos desvios (Tabela 12).

Tabela 12 – Variância do erro padrão planimétrico.

Classe	Escala						
	1/50	1/75	1/100	1/250	1/500	1/750	1/1000
A	0,00004	0,00008	0,00014	0,00090	0,00361	0,00813	0,01445
B	0,00011	0,00025	0,00045	0,00281	0,01125	0,02531	0,04500
C	0,00031	0,00070	0,00125	0,00781	0,03125	0,07031	0,12500
D	0,00045	0,00101	0,00180	0,01125	0,04500	0,10125	0,18000

Fonte: Autora (2019).

Assim, baseado nas variâncias dos erros padrões para cada classe da PEC-PCD e na variância das coordenadas planimétricas, foram obtidos os qui-quadrados das componentes X e Y (Equação 10), trazidos pelas Tabelas 13 e 14, respectivamente.

Tabela 13 – Cálculo estatístico para a coordenada X.

Classe	Escala						
	1/50	1/75	1/100	1/250	1/500	1/750	1/1000
A	24,309	10,804	6,077	0,972	0,243	0,108	0,061
B	7,806	3,469	1,952	0,312	0,078	0,035	0,020
C	2,810	1,249	0,703	0,112	0,028	0,012	0,007
D	1,952	0,867	0,488	0,078	0,020	0,009	0,005

Fonte: Autora (2019).

Tabela 14 – Cálculo estatístico para a coordenada Y.

Classe	Escala						
	1/50	1/75	1/100	1/250	1/500	1/750	1/1000
A	2,718	1,208	0,680	0,109	0,027	0,012	0,007
B	0,873	0,388	0,218	0,035	0,009	0,004	0,002
C	0,314	0,140	0,079	0,013	0,003	0,001	0,001
D	0,218	0,097	0,055	0,009	0,002	0,001	0,001

Fonte: Autora (2019).

Em seguida, comparando-se seu valor tabelado (Anexo B), como mostra a Equação 11, o valor do qui-quadrado para os parâmetros de 10% de significância e 3 graus de liberdade, apresenta-se como 6,2514. Nesse sentido, o desvio padrão das coordenadas pode ser considerado estatisticamente igual ao desvio padrão do EP quando os valores forem inferiores ao tabelado, sendo expostos o resultado da avaliação de exatidão em X na Tabela15 e em Y na Tabela 16.

Tabela 15 – Avaliação de exatidão para a coordenada X.

Classe	**Escala**						
	1/50	1/75	1/100	1/250	1/500	1/750	1/1000
A	Não Atende	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
B	Não Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
C	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
D	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende

Fonte: Autora (2019).

Tabela 16 – Avaliação de exatidão para a coordenada Y.

Classe	**Escala**						
	1/50	1/75	1/100	1/250	1/500	1/750	1/1000
A	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
B	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
C	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
D	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende

Fonte: Autora (2019).

É possível notar que para X, a análise de exatidão cartográfica atende aos requisitos das classes C e D para todas as escalas investidas, da classe B não atende apenas à escala 1/50 e da classe A não atende a escalas maiores que 1/100. Enquanto para a coordenada Y, a hipótese nula é aceita como classe A para todas.

Já para a análise altimétrica, o erro padrão foi calculado a partir da equidistância das curvas de nível em cada escala. Para isso, foi adotado o parâmetro de proporcionalidade de 1:1000 da equidistância para as escalas avaliadas, isto é, na escala 1/1000 foi estabelecido a distância de 1 metro entre as curvas, na 1/750 a distância de 0,75m e assim sucessivamente. Desse modo, foi possível determinar o erro padrão altimétrico para essas classes (Tabela 17) segundo os padrões propostos no PEC-PCD.

Tabela 17 – Erro padrão altimétrico.

Classe	**Escala**						
	1/50	1/75	1/100	1/250	1/500	1/750	1/1000
A	0,008	0,013	0,017	0,042	0,083	0,125	0,167
B	0,017	0,025	0,033	0,083	0,167	0,250	0,333
C	0,020	0,030	0,040	0,100	0,200	0,300	0,400
D	0,025	0,038	0,050	0,125	0,250	0,375	0,500

Fonte: Autora (2019).

Após essa etapa, é possível definir a variância do erro padrão altimétrico. Nesse caso, como o valor proposto no ET-ADGV já se refere unicamente à coordenada Z, não é necessário realizar a decomposição como é feita na Equação 9 para as coordenadas planimétricas, portanto a variância é obtida apenas elevando o valor do EP ao quadrado, cujos resultados são apresentados na Tabela 18.

Tabela 18 – Variância do erro padrão altimétrico.

Classe	**Escala**						
	1/50	1/75	1/100	1/250	1/500	1/750	1/1000
A	0,0001	0,0002	0,0003	0,0017	0,0069	0,0156	0,0278
B	0,0003	0,0006	0,0011	0,0069	0,0278	0,0625	0,1111
C	0,0004	0,0009	0,0016	0,0100	0,0400	0,0900	0,1600
D	0,0006	0,0014	0,0025	0,0156	0,0625	0,1406	0,2500

Fonte: Autora (2019).

Dessa maneira, o cálculo do qui-quadrado altimétrico é calculado de forma análoga às outras coordenadas, segundo a expressão da Equação 10, encontrando os valores relacionados às escalas e classes avaliadas conforme a Tabela 19.

Tabela 19 – Cálculo estatístico para a coordenada Z

Classe	**Escala**						
	1/50	1/75	1/100	1/250	1/500	1/750	1/1000
A	5,164	2,295	1,291	0,207	0,052	0,023	0,013
B	1,291	0,574	0,323	0,052	0,013	0,006	0,003
C	0,896	0,398	0,224	0,036	0,009	0,004	0,002
D	0,574	0,255	0,143	0,023	0,006	0,003	0,001

Fonte: Autora (2019)

Finalmente, a análise da exatidão posicional na coordenada Z (Tabela 20) pode ser realizada através da comparação entre os resultados dos qui-quadrados encontrados e seu dado estabelecido para o grau de liberdade 3 e intervalo de confiança de 90 %, sendo este 6,2514, como dito anteriormente.

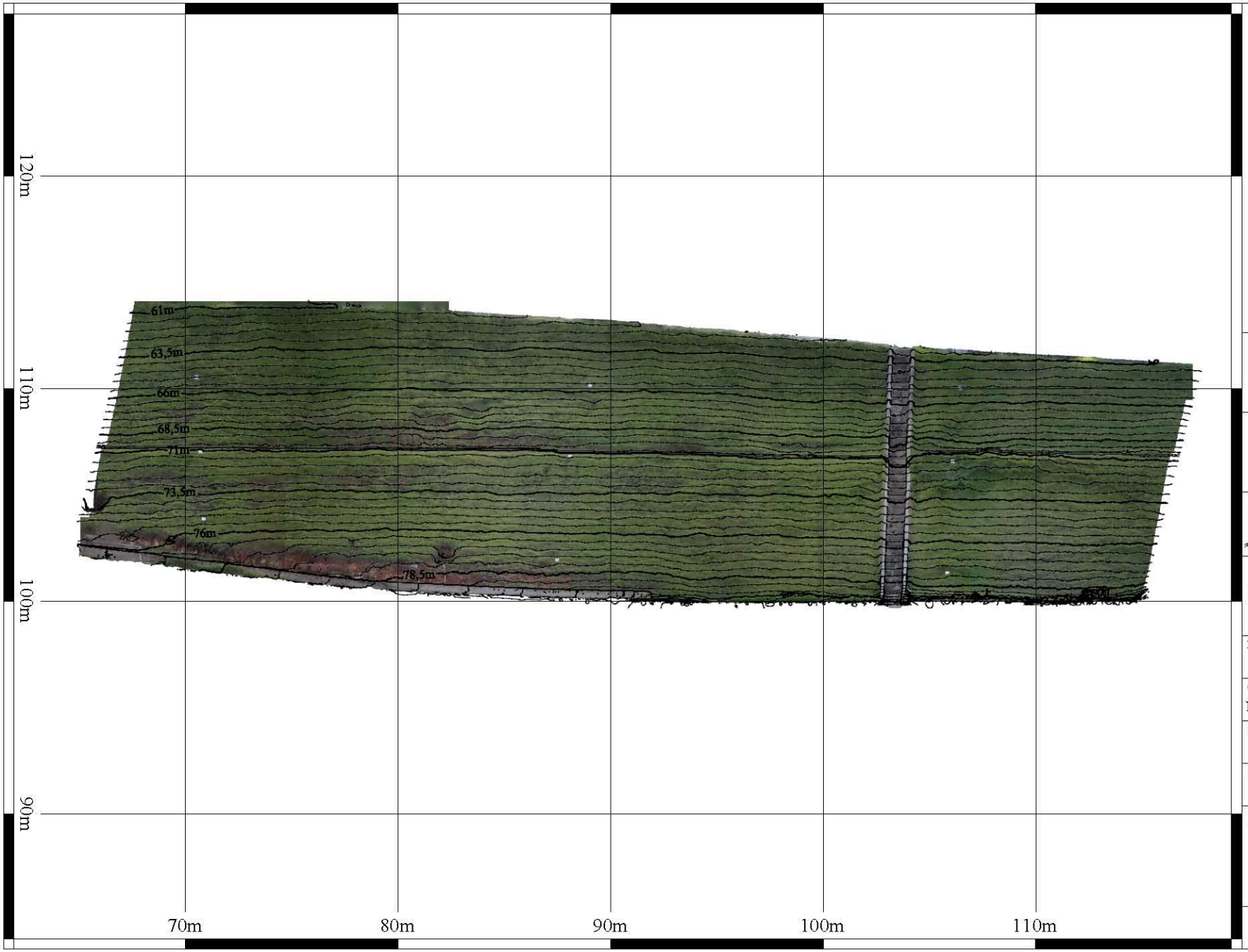
Tabela 20 – Avaliação de exatidão para a coordenada Z.

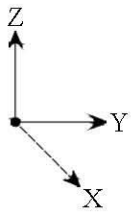
Classe	Escala						
	1/50	1/75	1/100	1/250	1/500	1/750	1/1000
A	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
B	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
C	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
D	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende

Fonte: Autora (2019).

Portanto, na análise de exatidão cartográfica executada para as coordenadas altimétricas, os resultados de Z atenderam aos requisitos das classes estabelecidas no PEC-PCD de maneira análoga à Y, passando no teste de hipóteses para todas as escalas nas classes investidas nas classes A, B, C e D.

Assim, analisando os resultados da exatidão posicional, os produtos cartográficos gerados foram apresentados em uma escala em que a classe A fosse alcançada por todas as coordenadas, escolhida arbitrariamente a escala 1/250. Na Figura 30 é apresentado o mapa planialtimétrico do ortomosaico referenciado ao sistema de coordenas locais. Para os modelos digitais de elevação, a representação no plano YZ encontra-se na Figura 31 e sua projeção no plano XY é disposta na Figura 32. Vale ressaltar que, apesar da equidistância vertical definida para a escala utilizada ser de 0,25m, a utilizada nos mapas confeccionados foi de 0,5m, com a finalidade de facilitar a visualização e evitar o excesso de informações, visto que por se tratar de um terreno com inclinação considerável, o número de curvas de nível para a equidistância determinada seria significativamente grande.





SISTEMA CATERSIANO TRIDIMENSIONAL LOCAL

PROJEÇÃO NO PLANO YZ

COORDENADAS TOPOGRÁFICAS

ORIGEM ARBITRÁRIA:
X= 100m; Y=100m; Z= 100m

LEGENDA

Curva Mestra

Curva Intermediária

ESCALA GRÁFICA

0m 2,5m 5m 7,5m 10m

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES

MAPA DE ORTOMOSAICO EM ESCALA 1/250

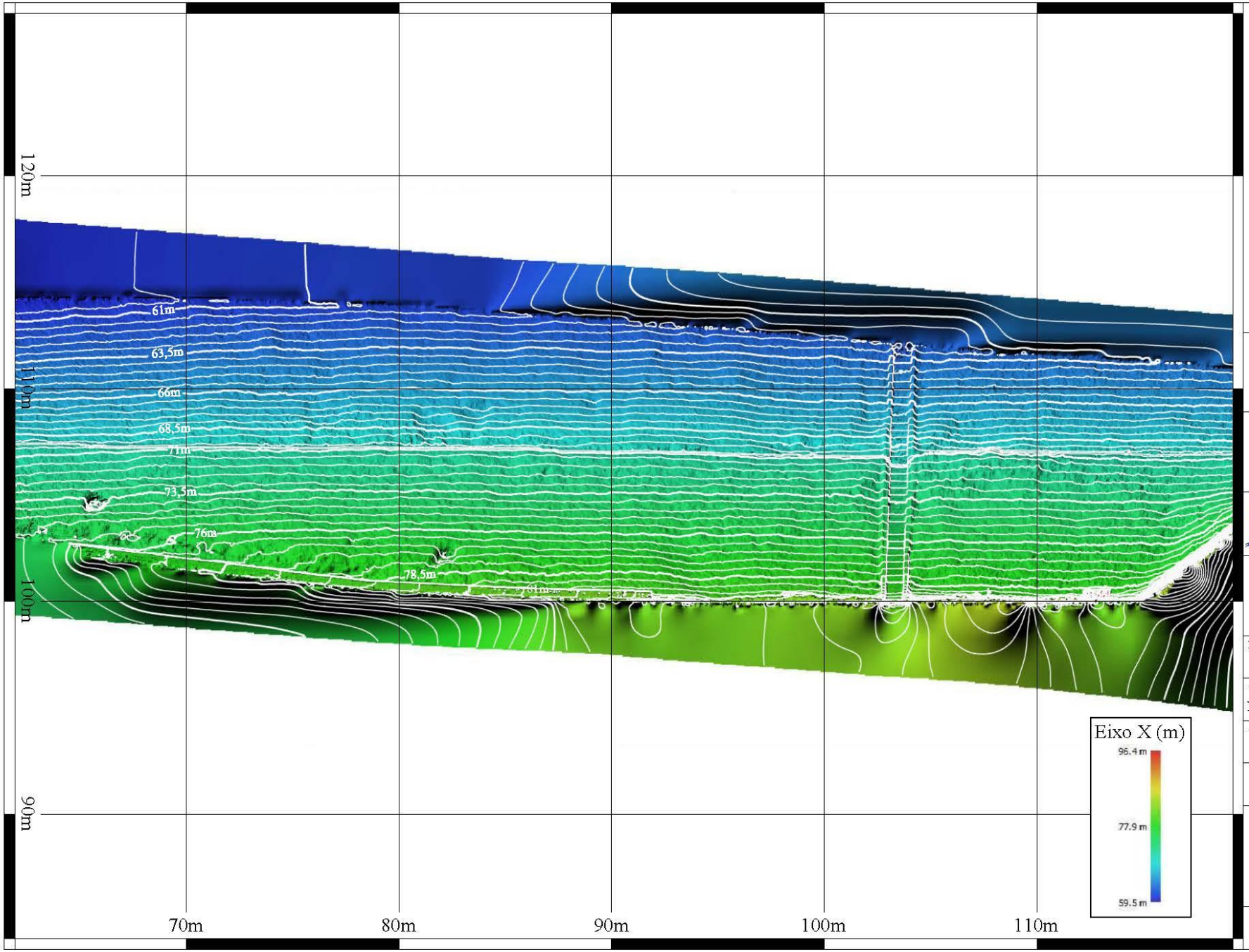
Escala do projeto:	Data do levantamento:	
1/250	28/02/2019	
Câmera:	Sensor:	Distância focal:
NIKON D7000	CMOS	18mm
Curvas de Nível:	Equidistância Vertical:	
Eixo X	0,50m	
N° de ortofotos:	N° de faixas:	Distância Média:
47	3	26,6m

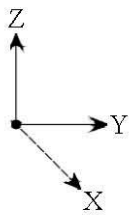
Autoria:

Kalima Mendes Pitombeira

Kalima Mendes Pitombeira

Figura 30 - Pág. 71





SISTEMA CATERSIANO TRIDIMENSIONAL LOCAL

PROJEÇÃO NO PLANO YZ

COORDENADAS TOPOGRÁFICAS

ORIGEM ARBITRÁRIA:
X= 100m; Y=100m; Z= 100m

LEGENDA

Curva Mestra

Curva Intermediária

ESCALA GRÁFICA

0m 2,5m 5m 7,5m 10m

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES

MAPA DE MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO NO PLANO YZ EM ESCALA 1/250

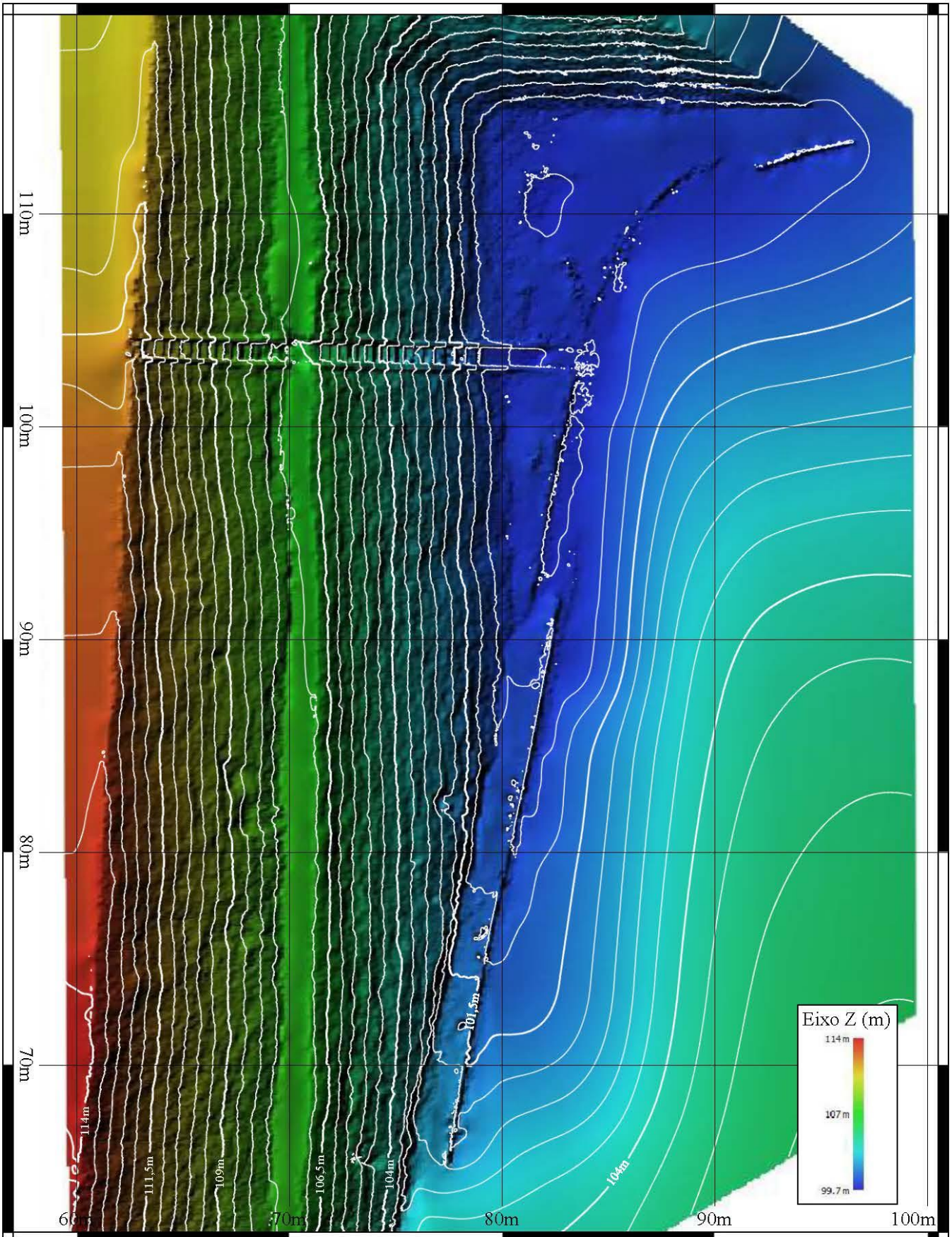
Escala do projeto:	Data do levantamento:	
1/250	28/02/2019	
Câmera:	Sensor:	Distância focal:
NIKON D7000	CMOS	18mm
Curvas de Nível:	Equidistância Vertical:	
Eixo X	0,50m	
N° de ortofotos:	N° de faixas:	Distância Média:
47	3	26,6m

Autoria:

Kalima Mendes Pitombeira

Kalima Mendes Pitombeira

Figura 31 - Pág. 72



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES

MAPA DE MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO NO PLANO XY EM ESCALA 1/250

Y
X
Z

SISTEMA CATERSIANO TRIDIMENSIONAL LOCAL

PROJEÇÃO NO PLANO XY

COORDENADAS TOPOGRÁFICAS

ORIGEM ARBITRÁRIA:
X= 100m; Y=100m; Z= 100m

Escala do projeto:	Data do levantamento:	
1/250	28/02/2019	
Câmera:	Sensor:	Distância focal:
NIKON D7000	CMOS	18mm
Curvas de Nível:	Equidistância Vertical:	
Eixo Z	0,50m	
Nº de ortofotos:	Nº de faixas	Distância Média:
	3	26,6m

ESCALA GRÁFICA

0m 2,5m 5m 7,5m 10m

LEGENDA

Curva Mestra

Curva Intermediária

Autora:
Kalima Mendes Pitombeira
Kalima Mendes Pitombeira

Figura 32 - Pág. 73

CAPÍTULO 07

CONCLUSÃO

O desenvolvimento das metodologias para aquisição de dados espaciais, derivado dos avanços tecnológicos nas últimas décadas, possibilitou que o processo de produção cartográfica se tornasse mais simples, rápido e eficiente. Dentre o aprimoramento das técnicas já existentes e o surgimento de novas, o método emergente de *Structure from Motion* atrelado ao *Multi-View Stereo* vem se consolidando como uma alternativa para a realização de levantamentos de informações tridimensionais de superfícies e objetos por permitir a geração de modelos digitais de alta qualidade, com grande nível de detalhamento devido à densidade de pontos e custos consideravelmente baixos quando comparado a técnicas de varredura como o *laser scanner*, além de não exigir conhecimentos significativamente específicos e rigor extremo na execução do trabalho de campo como a fotogrametria tradicional e a topografia clássica.

Desse modo, mesmo sendo proposto inicialmente para aplicações sem finalidades cartográficas, o emprego de SfM-MVS passou a ser explorado no âmbito das ciências geodésicas, dando origem a diversas pesquisas com o intuito de avaliar seus produtos quanto à precisão e acurácia dos dados. Nesse contexto, o referente trabalho foi desenvolvido com a intenção de discutir o uso dessa metodologia na coleta de informações espaciais, dependendo dos parâmetros de qualidade posicional requeridos.

Os resultados encontrados referente à geração dos modelos digitais e do ortomosaico deixam claro que a grande quantidade de pontos oriundos da nuvem densificada permitem a representação visual rica em detalhamento e a descrição do relevo do talude analisado. Já no referente à avaliação da precisão das medidas, pode-se perceber que essa abordagem abrange a aplicação para diversas atividades relacionadas às geociências por apresentar desvio submétrico quando as fotografias são capturadas a dezenas ou centenas de metros.

Como exemplo, podem ser citados o monitoramento de questões ambientais como movimento da lava, deslizamentos de terras e incêndios florestais, estudos de falhas geológicas, pesquisas de geologia estrutural, quantificação de perdas de solo e da erosão em voçorocas, medições glaciológicas e análise de relevos. Além disso,

permite que seu uso se estenda para outras áreas do conhecimento como arquitetura, em projetos de revitalização de prédios históricos e arqueologia para investigação de sítios arqueológicos.

Quanto à verificação da tendência, devido aos cuidados realizados em campo para a determinação da posição dos pontos de controle e durante o georreferenciamento dos modelos, a distribuição de dados não apresentou erros sistemáticos segundo o teste de hipóteses com 90 % de nível de confiança. A avaliação da acurácia posicional em relação ao PEC-PCD também apresentou resultados satisfatórios no tocante à qualidade dos dados espaciais, apresentando a técnica de SfM-MVS como uma alternativa para obtenção de produtos cartográficos planialtimétricos para escalas grandes, visto que todas as coordenadas atenderam aos requisitos de classe A para escalas menores ou iguais a 1/100.

Ademais, a aplicação dessa metodologia possui limitações, assim como todas as demais, principalmente ligadas aos requisitos computacionais requeridos, visto que, por se tratar de um procedimento majoritariamente automatizado, as condições de *hardware* são significativamente importantes e influenciam o tempo a ser utilizado para a realização do processamento das imagens digitais.

Entretanto, a tendência dos avanços tecnológicos se direciona a desenvolver algoritmos que exijam cada vez menos desempenho computacional e permitam a geração de dados com maior qualidade e melhor acurácia posicional, estabelecendo o potencial da abordagem de *Structure from Motion* e *Multi-View Stereo* para se tornar uma das principais vertentes a ser seguida pela comunidade científica e pela sociedade em geral para o futuro das técnicas de aquisição de dados espaciais por fotogrametria digital.

REFERÊNCIAS

AGISOFT. **Agisoft PhotoScan User Manual**: Professional Edition, Version 1.4. 2018.

ANDRADE, J. B de. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998. 258p.

ANTUNES, A. F. B.; LINGNAU, C. Uso de Índices de Acurácia para Avaliação de Mapas Temáticos Obtidos por Meio de Classificação Digital. In: CONGRESSO E FEIRA PARA USUÁRIOS DE GEOPROCESSAMENTO, 3. Curitiba, **Anais**... Curitiba, 1997.

BASTIAN, A. V. **CityGML e fotogrametria digital na documentação arquitetônica**: potencialidades e limitações. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 7., 2015, Recife. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2015.

BAY, H.et al. Speeded-up robust features (SURF). **Computer vision and image understanding**, v. 110, n. 3, p. 346-359, 2008.

BAYRAK, N. B.et al. Assessment of changes in masseter muscle by three-dimensional close-range photogrammetry after Botulinum toxin type-A injection: A case report with review of literature. **Journal of the Pakistan Medical Association**, v. 69, n. 3, p. 418-422, 2019.

BEMIS, S. P. et al. Ground-based and UAV-based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. **Journal of Structural Geology**, v. 69, p. 163-178, 2014.

BOIKE, J.; YOSHIKAWA, K. Mapping of periglacial geomorphology using kite/balloon aerial photography. **Permafrost and periglacial processes**, v. 14, n. 1, p. 81-85, 2003.

BÖRJESSON, E.; VON HOFSTEN, C. Visual perception of motion in depth: Application of a vector model to three-dot motion patterns. **Perception & Psychophysics**, v. 13, n. 2, p. 169-179, 1973.

BRASIL. **Decreto Lei n° 89.917, de 20 de junho de 1984**. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília (DF), 22 jun. 1984.

BROWN, M.; LOWE, D.G. Unsupervised 3D Object Recognition and Reconstruction in Unordered Datasets. In: **3DIM**. 2005. p. 56-63.

BRYSON, M. et al. Kite aerial photography for low-cost, ultra-high spatial resolution multi-spectral mapping of intertidal landscapes. **PloS one**, v. 8, n. 9, e73550, 2013.

BUCHANAN, A. M.; FITZGIBBON, A. W. Damped newton algorithms for matrix factorization with missing data. In: 2005 IEEE COMPUTER SOCIETY CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION. **Proceedings**… 2005. p. 316-322.

CALONDER, M. et al. Brief: Binary robust independent elementary features. In: EUROPEAN CONFERENCE ON COMPUTER VISION. 2010. Springer, Berlin, Heidelberg. **Proceedings**...2010. p. 778-792.

CASTILLO, C. et al. Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 4, p. 1319-1332, 2012.

CASTILLO, C. et al. SF3M software: 3-D photo-reconstruction for non-expert users and its application to a gully network. **Soil**, v. 1, n. 2, p. 583, 2015.

CENTENO, J. S.; WUTKE, J. D.; KERSTING, A. P. B. Comparação de geração de modelos tridimensionais usando laser scanner terrestre e restituição fotogramétrica monocular. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO-SIMGEO, 1., 2004. Recife. **Anais**... Recife: UFPE, 2004.

COMISSÃO NACIONAL DE CARTOGRAFIA (CONCAR-EB). **Especificação Técnica para Estruturação de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-EDGV)**. Estrutura de Dados Geoespaciais Vetoriais (EDGV). Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE). Diretoria de Serviço Geográfico (DSG). 2011.

CURRIER, K. Mapping with strings attached: Kite aerial photography of Durai Island, Anambas Islands, Indonesia. **Journal of Maps**, v. 11, n. 4, p. 589-597, 2015.

DANDOIS, J. P.; ELLIS, E. C. Remote sensing of vegetation structure using computer vision. **Remote Sensing**, v. 2, n. 4, p. 1157-1176, 2010.

ELTNER, A. et al. Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 40, n. 6, p. 741-755, 2015.

ENGELS, Chris; STEWÉNIUS, Henrik; NISTÉR, David. Bundle adjustment rules. **Photogrammetric computer vision,** v. 2, n. 2006.

FERNANDES, F. S. **Aplicação de fotogrametria terrestre digital na análise de descontinuidades em maciços rochosos**: exame comparativo com técnicas tradicionais. 2010. 126f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

FERREIRA, G. F. **Emprego de simulação no controle de qualidade em cartografia aplicado a modelos digitais de superfícies oriundos de sensores orbitais segundo PEC-PCD**. 2014. 140f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) – Universidade Federal do Pernambuco. Recife, 2014.

FERRER, V. et al. A multiscale approach to assess geomorphological processes in a semiarid badland area (Ebro Depression, Spain). **Geographical Research Letters**. v. 43, n.1, p. 4-62, 2017.

FISCHLER, M. A.; BOLLES, R.C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. **Communications of the ACM**, v. 24, n. 6, p. 381-395, 1980.

FONSTAD, M. A. et al. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, n. 4, p. 421-430, 2013.

FURUKAWA, Y. et al. Towards internet-scale multi-view stereo. In: IEEE COMPUTER SOCIETY CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION. 2010. **Proceedings**… São Francisco, Estados Unidos, 2010. p. 1434-1441.

FURUKAWA, Y.; PONCE, J. Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. In: IEEE COMPUTER SOCIETY CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION. 2007. **Proceedings**…, Minneapolis, Estados Unidos 2007.

GALO, M.; CAMARGO, P. de O. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO,1., Florianópolis, 1994. **Anais**... Florianópolis: Tomo II, 1994, p. 41-48.

GEMAEL, C. G.; MACHADO, A. M. L. M.; WANDRESEN, R. **Introdução ao ajustamento de observações**: aplicações geodésicas. 2ed. Curitiba: Ed. UFPR, 2015. 430p.

GIBSON, J. J. What gives rise to the perception of motion?. **Psychological Review**, v. 75, n. 4, p. 335-346, 1968.

GREEN, S.; BEVAN, A.; SHAPLAND, M. A comparative assessment of structure from motion methods for archaeological research. **Journal of Archaeological Science**, v. 46, p. 173-181, 2014.

HARWIN, S.; LUCIEER, A. Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. **Remote Sensing**, v. 4, n. 6, p. 1573-1599, 2012.

HASHIM, K. A. et al. Integration of low altitude aerial & terrestrial photogrammetry data in 3D heritage building modeling. In: 2012 IEEE CONTROL AND SYSTEM GRADUATE RESEARCH COLLOQUIUM. 2012. **Proceedings**…, 2012. p. 225-230.

HOUGH, P.V.C. **Method and means for recognizing complex patterns.** U.S. Patent n. 3,069,654, 18 dez. 1962.

JAMES, M. R.; APPLEGARTH, L. J.; PINKERTON, H. Lava channel roofing, overflows, breaches and switching: insights from the 2008–2009 eruption of Mt. Etna. **Bulletin of Volcanology**, v. 74, n. 1, p. 107-117, 2011.

JAMES, M. R.; ROBSON, S. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 39, n. 10, p. 1413-1420, 2014.

JAMES, M. R.; ROBSON, S. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, n. F3, 2012.

JAMES, M. R.; VARLEY, N. Identification of structural controls in an active lava dome with high resolution DEMs: Volcán de Colima, Mexico. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 22, 2012.

JAVERNICK, L.; BRASINGTON, J.; CARUSO, B. Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. **Geomorphology**, v. 213, p. 166-182, 2014.

JOHANSSON, G. Visual perception of biological motion and a model for its analysis. **Perception & psychophysics**, v. 14, n. 2, p. 201-211, 1973.

JOHNSON, K. et al. Rapid mapping of ultrafine fault zone topography with structure from motion. **Geosphere**, v. 10, n. 5, p. 969-986, 2014.

KHALAF, A. et al. 3D Digital modeling for archeology using close range photogrammetry. **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences, v. 16, p. 1-4, 2008.

KLEIN, I. **Controle de qualidade no ajustamento de observações geodésicas**. 2011. 322f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

LEHMANN, G. **Photogrammetrie**. Tradução Daniel Montaña Jou. 1ed. Espanhola. Barcelona: Editores Técnicos Associados. 1975.

LOWE, D. G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints. **International journal of computer vision**, v. 60, n. 2, p. 91-110, 2004.

LOWE, D.G. Object recognition from local scale-invariant features. In INTERNATIONAL CONFERENCEN COMPUTER VISION, 1999. Corfu, Greece. **Proceedings**...1999. p. 1150-1157.

LUCIEER, A.; JONG, S. M. de; TURNER, D. Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography. **Progress in Physical Geography**, v. 38, n. 1, p. 97-116, 2014.

MARCHETTI, D. A. B.; GARCIA, G. J. **Princípios de Fotogrametria e Fotointerpretação**. São Paulo: Nobel, 1986. 264p.

MARZOLFF, I.; RIES, J. B.; ALBERT, Klaus-Dieter. Kite aerial photography for gully monitoring in sahelian landscapes. In: WORKSHOP OF THE EARSEL SPECIAL INTEREST GROUP ON REMOTE SENSING FOR DEVELOPING COUNTRIES, 2. 2002. **Proceedings…** p. 18-20. 2002

MASSART, D. L. et al. Least median of squares: a robust method for outlier and model error detection in regression and calibration. **Analytica Chimica Acta**, v. 187, p. 171-179, 1986.

MATHEWS, A. J.; JENSEN, J. L. R. Three-dimensional building modeling using structure from motion: improving model results with telescopic pole aerial photography. In: APPLIED GEOGRAPHY CONFERENCE, 35. 2012. Minneapolis, USA. 2012. **Proceedings…** 2012.

MEER, P.; MINTZ, D.; ROSENFELD, A. Robust regression methods for computer vision: A review. **International journal of computer vision**, v. 6, n. 1, p. 59-70, 1991.

MICHELETTI N., CHANDLER J. H., LANE S. N. Structure from Motion (SfM) Photogrammetry. In: CLARKE, L. E; NIELD, J. M. (Editores). **Geomorphological Techniques** (Edição Online), Londres: British Society of Geomorphology, 2015b. cap. 2, seção 2.2.

MICHELETTI, N.; CHANDLER, J. H.; LANE, S.N. Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. Earth Surface Processes and Landforms, v. 40, n. 4, p. 473-486, 2015a.

MIKHAIL, E.; ACKERMAN, F. **Observations and Least Squares**. Nova York: Dun-Donneley Pub, 1976. 497p.

MILLER, J.; MORGENROTH, J.; GOMEZ, C. 3D modelling of individual trees using a handheld camera: Accuracy of height, diameter and volume estimates. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 14, n. 4, p. 932-940, 2015.

MOFFITT, F. H.; MIKHAIL, E. M. PHOTOGRAMMETRY. 3 ed. Nova York: Harper & Row Publishers, 1980. 648 p.

MONICO, J. F. G. et al. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 15, n. 3, p. 469-483, 2009.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS**: Descrição, fundamentos e aplicações. 2. São Paulo: Editora Unesp, 2008. 476 p.

MOREELS, P.; PERONA, P. Evaluation of features detectors and descriptors based on 3d objects. **International journal of computer vision**, v. 73, n. 3, p. 263-284, 2006.

NERO, M. A. **Propostas para o controle de qualidade de bases cartográficas com ênfase na componente posicional**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

NIETHAMMER, U. et al. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. **Engineering Geology**, v. 128, p. 2-11, 2012.

NIKON CORPORATION, 2010. **Câmera Digital D7000 Manual do Utilizador**. Edição em Português.

NOGUEIRA JR., J. B. **Controle de qualidade de produtos cartográficos**: uma proposta metodológica. 2003.147f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Cartográfica) - UNESP, Campus Presidente Prudente, Presidente Prudente - SP. 2003.

PALERMO, R. de A.; LEITE, T. C. **Integração de levantamento fotogramétrico aéreo com o uso de VANT e levantamento fotogramétrico terrestre para o mapeamento tridimensional das ruínas de São Miguel das Missões**. 2013. 174p. Monografia (Curso de Engenharia Cartográfica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

PAREDES, E. A. **Práticas Aerofotogramétricas e suas aplicações na engenharia**. Maringá: CONCITEC. 1986

PEREIRA, T. A. J.; NERO, M. A.Análise de normas de controle de qualidade posicional em cartografia ao redor do mundo: exemplos atuais de alguns países. In.: Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 4., 2012, Recife. **Anais**... Recife: UFPE, 2012. p. 1-9.

QU, Y.; HUANG, J.; ZHANG, X. Rapid 3D reconstruction for image sequence acquired from UAV camera. **Sensors**, v. 18, n. 1, p. 225, 2018.

RAUGUST, J.D.; OLSEN, M. J., Emerging technology: structure from motion. **LiDAR Magazine**, v. 3, n. 6, 2013.

ROCHA, R. S. **Exatidão cartográfica para as cartas digitais urbanas**. 2002. 127f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.

ROSNELL, T.; HONKAVAARA, E. Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadrocopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera. **Sensors**, v. 12, n. 1, p. 453-480, 2012.

ROUSSEEUW, P. J. Least median of squares regression. **Journal of the American statistical association**, v. 79, n. 388, p. 871-880, 1984.

RYAN, J. C. et al. UAV photogrammetry and structure from motion to assess calving dynamics at Store Glacier, a large outlet draining the Greenland ice sheet. **The Cryosphere**, v. 9, p.1-11, 2015.

SANTOŠI, Z. et al. 3D Digitization of featureless dental models using close range photogrammetry aided by noise based patterns. Facta Universitatis, Series: **Mechanical Engineering**, v. 16, n. 3, p. 297-305, 2018.

SCHLITZ, M. A review of low-level aerial archaeology and its application in Australia. **Australian Archaeology,** v. 59, n. 1, p. 51-58, 2004.

SEITZ, S. M. et al. A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. In: IEEE COMPUTER SOCIETY CONFERENCE ON COMPUTER VISION AND PATTERN RECOGNITION. 2006. **Proceedings**… p. 519-528.

SMITH, M. J.; CHANDLER, J.; ROSE, J. High spatial resolution data acquisition for the geosciences: kite aerial photography. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 34, n. 1, p. 155-161, 2009.

SMITH, M. W.; CARRIVICK, J. L.; QUINCEY, D. J. Structure from motion photogrammetry in physical geography. **Progress in Physical Geography,** v. 40, n. 2, p. 247-275, 2016.

SNAVELY, N., 2008. **Scene reconstruction and visualization from Internet photo collections**. 2008. 210f. Tese (Pós-doutorado em Filosofia) - University of Washington. Seattle, 2008.

SNAVELY, N.; SEITZ, S. M.; SZELISKI, R. Modeling the world from internet photo collections. **International journal of computer vision**, v. 80, n. 2, p. 189-210, 2008.

SNAVELY, N.; SEITZ, S. M.; SZELISKI, R. Photo tourism: exploring photo collections in 3D. **ACM transactions on graphics**, v. 25, n. 3, p. 835-846, 2006.

STRECHA, Christoph et al. LDAHash: Improved matching with smaller descriptors. **IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence**, v. 34, n. 1, p. 66-78, 2012.

STUMPF, A.et al. Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion. **Geomorphology**, v. 231, p. 130-145, 2015.

TAVANI, S.; CORRADETTI, A.; BILLI, A. High precision analysis of an embryonic extensional fault-related fold using 3D orthorectified virtual outcrops: The viewpoint importance in structural geology. **Journal of Structural Geology**, v. 86, p. 200-210, 2016.

TAVARES, P. E. M. FAGUNDES, P. M. **Fotogrametria**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia., 1991. 379p.

THAPA, K.; BOSSLER, J. Accuracy of Spatial Data Used in Geographic InformationSystems. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 58, p. 835-41, 1992.

TOMASI, C.; KANADE, T. Shape and motion from image streams under orthography: a factorization method. **International Journal of Computer Vision**, v. 9, n. 2, p. 137-154, 1992.

TOMMASELLI, A. M. G. et al. Fotogrametria: aplicações a curta distância. In: MENEGUETE Jr, M.; ALVES, N. (Org.), **FCT 40 anos, Perfil Científico Educacional**, Presidente Prudente (SP), p. 147-159, 1999.

TRIGGS, B. et al. Bundle adjustment—a modern synthesis. In: **International workshop on vision algorithms**. Corfu, Greece. Springer-Verlag 2000. p. 298-372.

TUFFEN, H. et al. Exceptional mobility of an advancing rhyolitic obsidian flow at Cordón Caulle volcano in Chile. **Nature Communications**, v. 4, p. 2709, 2013.

ULLMAN, S. The interpretation of structure from motion. **Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences**, v. 203, n. 1153, p. 405-426, 1979.

VASUKI, Y. et al. Semi-automatic mapping of geological Structures using UAV-based photogrammetric data: An image analysis approach. **Computers & Geosciences**, v. 69, p. 22-32, 2014.

VEIGA, L. A. K.; ZANETTI, M. A. Z.; FAGGION, P. L. **Fundamentos de Topografia**. Universidade Federal do Paraná, Curso de Engenharia Cartográfica, 2012, 288p.

VERHOEVEN, G. J. J. Providing an archaeological bird's: eye view–an overall picture of ground-based means to execute low-altitude aerial photography (LAAP) in Archaeology. **Archaeological Prospection**, v. 16, n. 4, p. 233-249, 2009.

VERICAT, D. et al. Accuracy assessment of aerial photographs acquired using lighter-than-air blimps: low-cost tools for mapping river corridors. **River Research and Applications**, v. 25, n. 8, p. 985-1000, 2008.

VIANA, C. D. et al. Structural analysis of clastic dikes using Structure from Motion-Multi-View Stereo: a case-study in the Paraná Basin, southeastern Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 48, n. 4, p. 839-852, 2018.

WERNER, T.; SCHAFFALITZKY, F.; ZISSERMAN, A. Automated architecture reconstruction from close-range photogrammetry. **International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 34, n. 5/C7, p. 352-359, 2002.

WESTOBY, M. J. et al. ‘Structure-from-Motion’photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300-314, 2012.

WHITEHEAD, K.; MOORMAN, B. J.; HUGENHOLTZ, C. H. Brief Communication: Low-cost, on-demand aerial photogrammetry for glaciological measurement. **The Cryosphere**, v. 7, n. 6, p. 1879-1884, 2013.

WOLF, P. R.; DEWITT, B. A.; WILKINSON, B. E. **Elements of photogrammetry with applications in GIS**. 4 ed. Estados Unidos: McGraw-Hill Education, 2014. 676 p.

APÊNDICES

APÊNDICE A – RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO NO AGISOFT

Report

Processing Report

21 May 2019

Survey Data

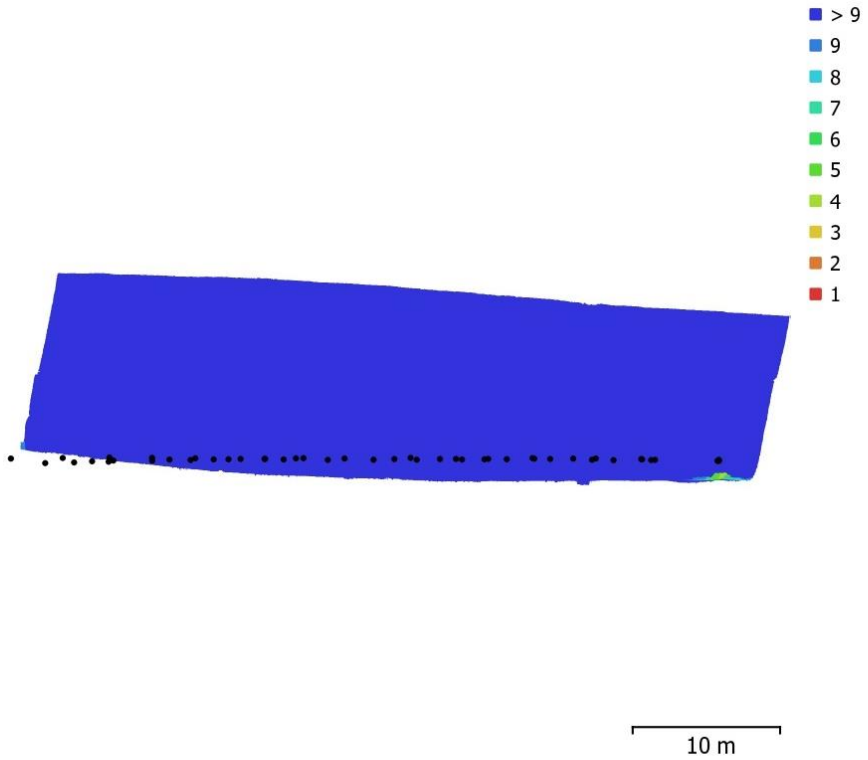


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	47	Camera stations:	47
Flying altitude:	26.6 m	Tie points:	55,913
Ground resolution:	6.6 mm/pix	Projections:	158,459
Coverage area:	624 m^2	Reprojection error:	0.584 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
NIKON D7000 (18 mm)	4928 x 3264	18 mm	4.88 x 4.88 um	Não

Table 1. Cameras.

Calibração da Câmara

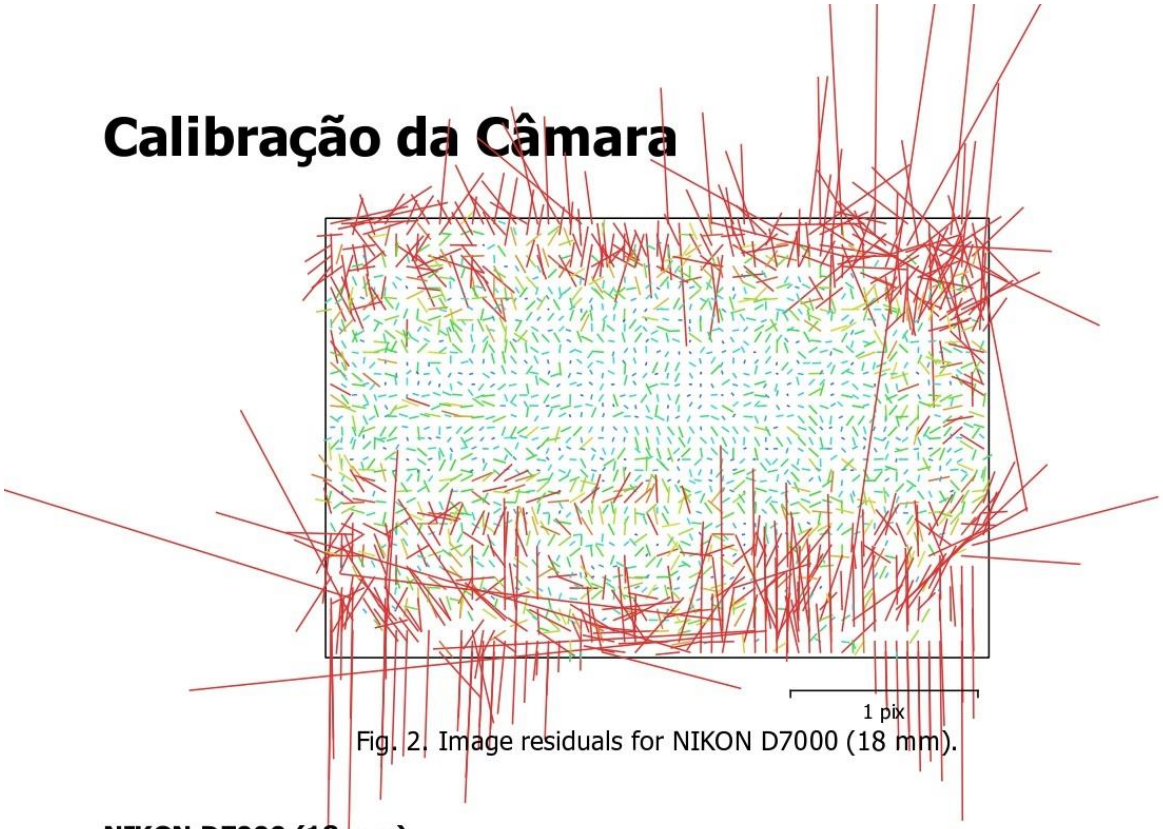


Fig. 2. Image residuals for NIKON D7000 (18 mm).

NIKON D7000 (18 mm)

47 images

Type	Resolution	Focal Length	Pixel Size
Frame	**4928 x 3264**	**18 mm**	**4.88 x 4.88 um**

	Valor	Error	F	Cx	Cy	B1	K1	K2	P1	P2
F	**3760.53**	0.58	1.00	-0.02	0.21	-0.95	0.05	0.05	-0.02	0.02
Cx	**-6.28506**	0.21		1.00	-0.09	0.05	0.11	-0.14	0.83	0.04
Cy	**38.7144**	0.24			1.00	-0.32	0.06	-0.24	-0.04	0.09
B1	**56.6831**	0.61				1.00	-0.06	0.07	0.04	-0.05
K1	**-0.163275**	4.1e-05					1.00	-0.86	0.08	0.00
K2	**0.124087**	8.3e-05						1.00	-0.10	-0.11
P1	**-0.000428502**	1.5e-05							1.00	-0.03
P2	**0.000459537**	9e-06								1.00

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Ground Control Points

Fig. 3. GCP locations and error estimates.
Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Número	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
5	1.46244	1.50184	1.1175	2.09625	2.37551

Table 3. Control points RMSE.

Número	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
4	1.55528	0.53685	1.02083	1.64533	1.93628

Table 4. Check points RMSE.

Rótulo	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Imagem (pix)
P3	-0.664192	1.01441	0.333927	1.25765	0.553 (25)
P1	0.797761	0.314983	-0.521342	1.00371	0.421 (21)
P5	-1.55969	-0.20044	1.23348	1.99857	0.474 (37)
P7	2.46749	1.61052	-1.89791	3.5049	0.430 (21)
P9	-1.04636	-2.74144	0.858594	3.05737	0.433 (31)
Total	**1.46244**	**1.50184**	**1.1175**	**2.37551**	**0.467**

Table 5. Control points.

Rótulo	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Imagem (pix)
P2	-0.572751	0.506338	0.558921	0.947003	0.507 (22)
P4	3.02285	0.0260093	-1.31667	3.29725	0.475 (32)
P6	-0.128817	-0.817608	0.86851	1.19974	0.538 (38)
P8	-0.439726	-0.476752	1.16964	1.33742	0.316 (30)
Total	**1.55528**	**0.53685**	**1.02083**	**1.93628**	**0.469**

Table 6. Check points.

Digital Elevation Model

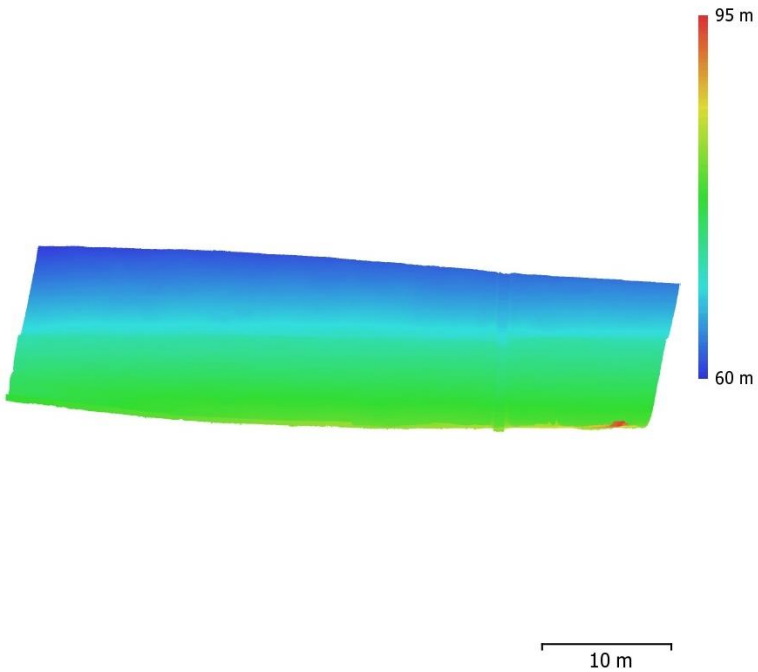


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 6.6 mm/pix
Point density: 230 points/cm^2

Processing Parameters

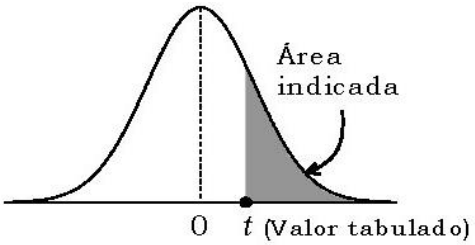
Geral	
Câmaras	47
Aligned cameras	47
Marcadores	9
Shapes	
Pontos	2
Coordinate system	**Local Coordinates (m)**
Rotation angles	**Yaw, Pitch, Roll**
Nuvem de Pontos	
Pontos	55,913 of 63,709
RMS reprojection error	0.175957 (0.583978 pix)
Max reprojection error	0.548371 (12.061 pix)
Mean key point size	3.00172 pix
Sobreposição efetiva	3.05502
Parâmetros de alinhamento	
Precisão	Highest
Generic preselection	Sim
Key point limit	40,000
Tie point limit	10,000
Matching time	2 minutes 43 seconds
Mapas de Profundidade	
Número	47
Parâmetros de reconstrução	
Qualidade	Ultra High
Filtering mode	Mild
Tempo de processamento	20 hours 44 minutes
Dense Point Cloud	
Pontos	35,210,579
Parâmetros de reconstrução	
Qualidade	Ultra High
Depth filtering	Mild
Depth maps generation time	20 hours 44 minutes
Dense cloud generation time	1 days 5 hours
Modelo	
Faces	5,217,982
Vértices	2,611,495
Texture	6,000 x 6,000 x 5, uint8
Parâmetros de reconstrução	
Surface type	Mapa de alturas / Terreno
Source data	Dense
Interpolation	Enabled
Qualidade	Ultra High
Depth filtering	Mild
Número de faces	7,032,688
Tempo de processamento	2 minutes 52 seconds
Parâmetros de texturização	
Modo de mapeamento	Generic
Modo de combinação	Mosaico
Texture size	6,000 x 6,000
Enable hole filling	Sim
UV mapping time	1 minutes 33 seconds
Blending time	54 minutes 12 seconds
DEM	
Tamanho	10,733 x 4,084
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Parâmetros de reconstrução	

Source data	Dense cloud
Interpolation	Enabled
Tempo de processamento	11 seconds
Orthomosaic	
Tamanho	7,923 x 2,184
Coordinate system	Local Coordinates (m)
Channels	3, uint8
Parâmetros de reconstrução	
Modo de combinação	Mosaico
Surface	Mesh
Enable hole filling	Sim
Tempo de processamento	1 minutes 20 seconds
Software	
Version	1.4.0 build 5076
Platform	Windows 64

ANEXOS

ANEXO A – TABELA DA DISTRIBUIÇÃO T DE STUDENT

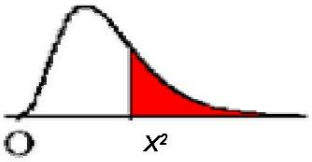
Distribuição ***t*** de *Student*



	Área na cauda superior								
gl	0,25	0,10	0,05	0,025	0,01	0,005	0,0025	0,001	0,0005
1	1,000	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	127,3	318,3	636,6
2	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,09	22,33	31,60
3	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453	10,21	12,92
4	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610
5	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773	5,894	6,869
6	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317	5,208	5,959
7	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,029	4,785	5,408
8	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,833	4,501	5,041
9	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	3,690	4,297	4,781
10	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	3,581	4,144	4,587
11	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	3,497	4,025	4,437
12	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,428	3,930	4,318
13	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,372	3,852	4,221
14	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,326	3,787	4,140
15	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,286	3,733	4,073
16	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,252	3,686	4,015
17	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,222	3,646	3,965
18	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,197	3,610	3,922
19	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,174	3,579	3,883
20	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,153	3,552	3,850
21	0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,135	3,527	3,819
22	0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,119	3,505	3,792
23	0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,104	3,485	3,768
24	0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,091	3,467	3,745
25	0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,078	3,450	3,725
26	0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,067	3,435	3,707
27	0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,057	3,421	3,689
28	0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,047	3,408	3,674
29	0,683	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,038	3,396	3,660
30	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,030	3,385	3,646
35	0,682	1,306	1,690	2,030	2,438	2,724	2,996	3,340	3,591
40	0,681	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	2,971	3,307	3,551
45	0,680	1,301	1,679	2,014	2,412	2,690	2,952	3,281	3,520
50	0,679	1,299	1,676	2,009	2,403	2,678	2,937	3,261	3,496
z	0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	2,807	3,090	3,291

ANEXO B – TABELA DA DISTRIBUIÇÃO QUI-QUADRADO

Distribuição Qui-Quadrado



gl L	0,990	0,950	0,900	0,500	0,100	0,050	0,025	0,010	0,005
1	0,0002	0,0039	0,0158	0,4549	2,7055	3,8415	5,0239	6,6349	7,8794
2	0,0201	0,1026	0,2107	1,3863	4,6052	5,9915	7,3778	9,2104	10,5965
3	0,1148	0,3518	0,5844	2,3660	6,2514	7,8147	9,3484	11,3449	12,8381
4	0,2971	0,7107	1,0636	3,3567	7,7794	9,4877	11,1433	13,2767	14,8602
5	0,5543	1,1455	1,6103	4,3515	9,2363	11,0705	12,8325	15,0863	16,7496
6	0,8721	1,6354	2,2041	5,3481	10,6446	12,5916	14,4494	16,8119	18,5475
7	1,2390	2,1673	2,8331	6,3458	12,0170	14,0671	16,0128	18,4753	20,2777
8	1,6465	2,7326	3,4895	7,3441	13,3616	15,5073	17,5345	20,0902	21,9549
9	2,0879	3,3251	4,1682	8,3428	14,6837	16,9190	19,0228	21,6660	23,5893
10	2,5582	3,9403	4,8652	9,3418	15,9872	18,3070	20,4832	23,2093	25,1881
11	3,0535	4,5748	5,5778	10,3410	17,2750	19,6752	21,9200	24,7250	26,7569
12	3,5706	5,2260	6,3038	11,3403	18,5493	21,0261	23,3367	26,2170	28,2997
13	4,1069	5,8919	7,0415	12,3398	19,8119	22,3620	24,7356	27,6882	29,8193
14	4,6604	6,5706	7,7895	13,3393	21,0641	23,6848	26,1189	29,1412	31,3194
15	5,2294	7,2609	8,5468	14,3389	22,3071	24,9958	27,4884	30,5780	32,8015
16	5,8122	7,9616	9,3122	15,3385	23,5418	26,2962	28,8453	31,9999	34,2671
17	6,4077	8,6718	10,0852	16,3382	24,7690	27,5871	30,1910	33,4087	35,7184
18	7,0149	9,3904	10,8649	17,3379	25,9894	28,8693	31,5264	34,8052	37,1564
19	7,6327	10,1170	11,6509	18,3376	27,2036	30,1435	32,8523	36,1908	38,5821
20	8,2604	10,8508	12,4426	19,3374	28,4120	31,4104	34,1696	37,5663	39,9969
21	8,8972	11,5913	13,2396	20,3372	29,6151	32,6706	35,4789	38,9322	41,4009
22	9,5425	12,3380	14,0415	21,3370	30,8133	33,9245	36,7807	40,2894	42,7957
23	10,1957	13,0905	14,8480	22,3369	32,0069	35,1725	38,0756	41,6383	44,1814
24	10,8563	13,8484	15,6587	23,3367	33,1962	36,4150	39,3641	42,9798	45,5584
25	11,5240	14,6114	16,4734	24,3366	34,3816	37,6525	40,6465	44,3140	46,9280
26	12,1982	15,3792	17,2919	25,3365	35,5632	38,8851	41,9231	45,6416	48,2898
27	12,8785	16,1514	18,1139	26,3363	36,7412	40,1133	43,1945	46,9628	49,6450
28	13,5647	16,9279	18,9392	27,3362	37,9159	41,3372	44,4608	48,2782	50,9936
29	14,2564	17,7084	19,7677	28,3361	39,0875	42,5569	45,7223	49,5878	52,3355
30	14,9535	18,4927	20,5992	29,3360	40,2560	43,7730	46,9792	50,8922	53,6719
35	18,5089	22,4650	24,7966	34,3356	46,0588	49,8018	53,2033	57,3420	60,2746
40	22,1642	26,5093	29,0505	39,3353	51,8050	55,7585	59,3417	63,6908	66,7660
45	25,9012	30,6123	33,3504	44,3351	57,5053	61,6562	65,4101	69,9569	73,1660
50	29,7067	34,7642	37,6886	49,3349	63,1671	67,5048	71,4202	76,1538	79,4898
55	33,5705	38,9581	42,0596	54,3348	68,7962	73,3115	77,3804	82,2920	85,7491
60	37,4848	43,1880	46,4589	59,3347	74,3970	79,0820	83,2977	88,3794	91,9518
70	45,4417	51,7393	55,3289	69,3345	85,5270	90,5313	95,0231	100,4251	104,2148
80	53,5400	60,3915	64,2778	79,3343	96,5782	101,8795	106,6285	112,3288	116,3209
90	61,7540	69,1260	73,2911	89,3342	107,5650	113,1452	118,1359	124,1162	128,2987
100	70,0650	77,9294	82,3581	99,3341	118,4980	124,3421	129,5613	135,8069	140,1697
110	78,4582	86,7916	91,4710	109,3341	129,3852	135,4802	140,9165	147,4143	151,9482
120	86,9233	95,7046	100,6236	119,3340	140,2326	146,5673	152,2113	158,9500	163,6485

Tabela que fornece valores c tais que
$P(\chi_n > c) = p$, onde n é o número de graus de liberdade

Agência Brasileira ISBN
ISBN: 978-65-86230-13-0